
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802R022 – Informatika a logistika

Tvorba analýzy FMECA pro vstřikovací formu a stroj s návazností na udržovatelnost v Cadence Innovation k.s.

**Creation FMECA analysis for injection molding machine and
form, leads to maintainability in Cadence Innovation k. s.
company**

Bakalářská práce

Autor:	Lubomír Sivčák
Vedoucí práce:	Ing. Jan Kamenický
Konzultant:	Ing. Pavel Fuchs
	Ing. Jaroslav Zajíček

V Liberci 14.5.2008

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kamenickému za cenné rady, připomínky a odbornou pomoc. Současně děkuji Ing. Josefu Chudobovi, Ing. Pavlu Fuchsovi CSc. a Ing. Jaroslavu Zajíčkovi za poskytnuté konzultace.

Abstrakt

Účelem práce je vyhodnotit riziko, které je způsobováno poruchovými stavy vstřikovacího stroje na výrobu termoplastů, a to z pohledu ztrát. Každý poruchový stav představuje neočekávané náklady, spojené s odstraněním poruchy nebo případným nedodržáním termínu dodávky. Úloha je řešena na praktickém příkladě ve společnosti Cadence Innovation k. s., která dodala údaje o poruchách pro vstřikovací stroj a formu. Tato zařízení se používají na výrobu plastových dílů pro automobilový průmysl. Společnost Cadence Innovation k. s. je výrobcem a dodavatelem plastových výrobků jako jsou lakované nárazníky, přístrojové desky, dveřní výplně a mřížky chladiče.

První část práce obsahuje stručný popis technologie vstřikování plastů. Dále následuje výklad teorie spolehlivosti a teorie pravděpodobnosti, která je důležitá pro pochopení ukazatelů spolehlivosti. Následně je na základě získaných poznatků a technických norem vypracována analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA), Paterova analýza a matice rizika. Pro každou analýzu je nejprve popsán obecný postup a poté řešení pro daný systém. Výsledky jednotlivých analýz hodnocení rizika jsou mezi sebou porovnány.

Druhá část práce je zaměřena na udržovatelnost vstřikovacího stroje a tvorbu formuláře udržovatelnosti. Je využita metoda pro přidělení udržovatelnosti pro jednotlivé subsystémy stroje. Postup metody je odvozen na základě technické normy. Je zpracováno grafické řešení pomocí pravděpodobnostního papíru. Výsledky jsou prezentovány v podobě formuláře, který lze využít v etapě návrhu udržovatelnosti pro vstřikovací stroj.

Klíčová slova: vstřikovací stroj, riziko, spolehlivost, udržovatelnost, FMECA

Abstract

Purpose of a bachelors work is to analyze risk that is caused by the failure modes of an injection molding machine, respectively in light of economic waste. Each failure mode represents sudden spending on system repair and supply late fee. Assignment is solved on a practice problem in Cadence Innovation k. s. company, which provides failures data about injection molding machine. These equipments are used on plastic parts production for automobile industry. Cadence Innovation is producer of plastic parts like painted bumpers, instrument panels, door panels, radiator grills.

Forepart included function description about thermoplastic injection molding. Farther come on expose dependability and probability theory, which is important to understanding dependability performance measures. Consequently is by pieces of knowledge and standard specifications elaborate a failure mode, effects and criticality analysis (FMECA), Pareto analysis and risk matrix. At first there is described common process for each analysis, then the solution for an existing system. Results are compared to each other.

The second part is focused on injection molding machine's maintainability and maintainability schedule's creation. It is used a maintainability assignment method for individual machine subsystems. The method process is derived from standard specification. It works on a graphic solution via probability plotting paper. Results are presented like a maintainability form, which can be utilized in maintainability molding machine concept.

Keywords: injection molding, risk, dependability, maintainability, FMECA

Obsah práce

Úvod.....	9
Seznam použitých značek.....	10
1 Princip vstřikování termoplastů.....	11
2 Teorie spolehlivosti.....	12
2.1 Úvod a dělení spolehlivosti.....	12
2.2 Objekty, poruchy a druhy poruch	13
3 Úvod do teorie pravděpodobnosti.....	15
3.1 Základní pojmy teorie pravděpodobnosti	15
3.2 Náhodná veličina	15
3.3 Zákony rozdělení pravděpodobnosti.....	16
3.4 Distribuční funkce.....	16
3.5 Hustota pravděpodobnosti	17
3.6 Intenzita náhodného jevu	18
3.7 Exponenciální rozdělení	19
3.8 Logaritmicko-normální rozdělení	20
4 Ukazatele spolehlivosti	21
4.1 Ukazatele bezporuchovosti	21
4.1.1 Pravděpodobnost bezporuchového provozu	21
4.1.2 (Okamžitá) Intenzita poruch	22
4.1.3 Střední doba do poruchy	22
4.2 Ukazatele pohotovosti.....	23
4.3 Ukazatele udržovatelnosti.....	23
5 Základní metody analýzy spolehlivosti	24
6 Analýza způsobů a důsledků poruch	26
6.1 Stručný historický přehled.....	26
6.2 Definice FMEA/FMECA podle ČSN ISO 50(191).....	26
6.3 Druhy analýzy.....	27
6.4 Účel analýzy FMEA	27
6.5 Určení čísla priority rizika v analýze FMECA	29
6.6 Příklad dokumentace FMECA.....	32
6.7 Shrnutí analýzy FMECA:	33
7 Analýza FMECA vstřikovacího stroje a formy	34
7.1 Získání dat o poruchovosti zařízení	34
7.2 Tvorba formuláře FMECA pro vstřikovací formu	35
7.3 Analýza FMECA pro vstřikovací stroj	39
7.4 Další metody pro analýzu rizika	40
7.4.1 Paretova analýza	40
7.4.2 Matice rizika	41
7.5 Aplikace jednoduchých nástrojů na vstřikovací stroj a formu	42
7.5.1 Paretova analýza	42
7.5.2 Matice rizika	44
8 Teorie udržovatelnosti technických zařízení	46
8.1 Metoda pro přidělení udržovatelnosti.....	47
8.1.1 Údaje potřebné pro přidělení udržovatelnosti.....	48
8.1.2 Postup přidělení udržovatelnosti podle ČSN IEC 706-6	49
8.1.3 Přidělení udržovatelnosti vstřikovacímu stroji	50
8.2 Výpočet parametrů rozdělení doby opravy po poruše v MS Excel	51

Závěr	56
Seznam použité literatury	57
Seznam příloh	57
Příloha A - Pomocné grafy hodnocení rizika pro vstřikovací stroje.....	58
Příloha B - Paretův diagram pro náklady a četnost poruch na vstřikovací formě	60
Příloha C - Grafické řešení distribuční funkce (pravděpodobnostní papír).....	62

Úvod

Cílem práce je v první části srozumitelně podat ucelený přehled a informace z teorie spolehlivosti a následně tyto poznatky uplatnit na praktickém problému ve společnosti Cadence Innovation, k. s.. V práci bude vysvětleno, co jsou ukazatele spolehlivosti

a uvedeny základní typy metod spolehlivosti. Z těchto metod je větší pozornost věnována metodě běžně označované jako FMEA a její rozšířené variantě FMECA. Je provedena aplikace metody FMECA a vybraných podpůrných analýz na stroji a formě, které se používají při výrobě plastových dílů ve firmě Cadence Innovation, k. s.. Výsledkem analýz bude vyjádření rizika, které je spojeno s možností neuskutečnění dodávky výrobků, jinými slovy nepokrytí poptávky odběratelů, což způsobuje společnosti významné finanční ztráty.

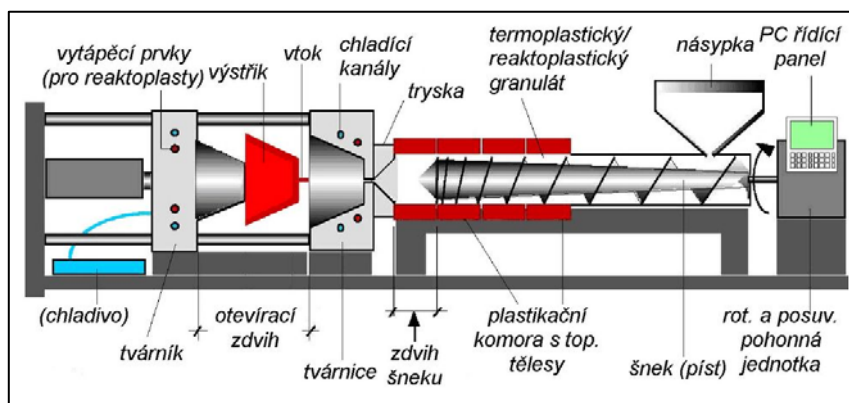
Druhá polovina práce se zabývá udržovatelností vstříkovacího stroje v Cadence Innovation k.s., a to z pohledu přidělení udržovatelnosti pro jednotlivé subsystémy stroje. V této fázi bude využito poznatků z ČSN IEC 706-6 a statistické literatury. Výsledky budou prezentovány v podobě formuláře a lze jich využít v návrhu udržovatelnosti pro vstříkový stroj.

Seznam použitých značek

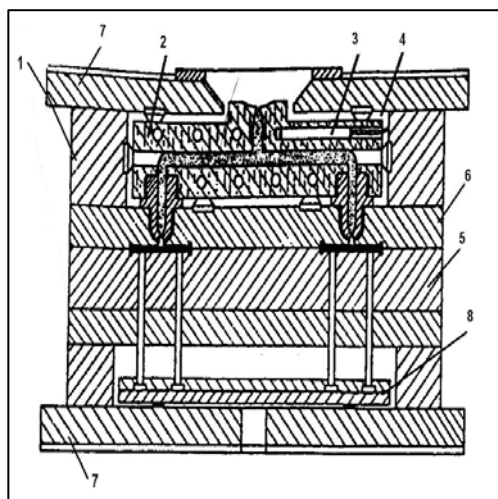
$A(t)$	Funkce okamžité pohotovosti
F_i	Kumulativní četnost
f_i	Relativní četnost
$U(t)$	Funkce okamžité nepohotovosti
λ	Intenzita poruch
μ	Intenzita oprav
μ	Střední hodnota
σ	Směrodatná odchylka
φ	Hodnota distribuční funkce standardního normálního rozdělení
Ω	Základní jevový prostor - množina všech možných výsledků náhodného pokusu
ACMT	Doba aktivní údržby po poruše (Active corrective maintenance time)
ACMT ₅₀	Medián dob aktivní údržby po poruše (Median active corrective maintenance time)
ACMT ₉₅	Maximální doba aktivní údržby po poruše (Maximum active corrective maintenance time)
FMEA	Analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků (Fault modes and effects analysis)
FMECA	Analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů (Fault modes, effects and criticality analysis)
LRU	Jednotka vyměnitelná v provozu (Line replaceable unit)
MACMT	Střední doba aktivní údržby po poruše (Mean active corrective maintenance time)
MTBF	Střední doba mezi poruchami (Mean time between failures)
MTTF	Střední doba do poruchy (Mean time to failure)
MTTM	Střední doba trvání do údržby (Mean Time to Maintenance)
MTTR	Střední doba do obnovy (Mean Time To Restoration)
RPN	Číslo priority rizika (Risk priority number)

1 Princip vstřikování termoplastů

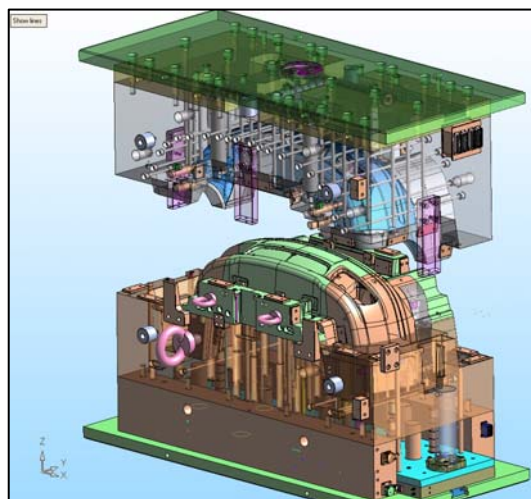
Technologický proces vstřikování termoplastů začíná tím, že se plastový granulát plní do násypky vstřikovacího stroje, ze které je poté sypán do komory. Z komory je granulát plastifikačním šnekem tlačén do válce, v němž se ohřívá a přemění se v taveninu. Ta vstupuje do trysky, kterou je vstřikována do formy. Po vychlazení se forma otvírá a výrobek se vyhazuje. Tento cyklus se stále opakuje.



Obr. 1: Princip vstřikovacího stroje [14]



Obr. 3: Schéma vstřikovací formy [6]



Obr. 2: 3D model vstřikovací formy [13]

Schéma vstřikovací formy:

1 - Topná deska, 2 - Blok vyhřívacích rozváděcích kanálků, 3 - Elektrické vytápění bloku, 4 - Vzduchová mezera, 5 - Tvárník, 6 - Tvárnice, 7 - Upínací deska, 8 - Vyrážecí deska

Podrobné informace o technologii vstřikování termoplastů jsou uvedeny v [10]

2 Teorie spolehlivosti

2.1 Úvod a dělení spolehlivosti

Spolehlivost jako vědní obor vznikl především díky neustálému rozvoji a rostoucí složitosti průmyslové výroby. Komplikované výrobní, dopravní a energetické technologie v sobě skrývají rizika v podobě poruch, kterým je nutné předcházet nejen z důvodů ekonomických ztrát, ale také z hlediska bezpečnosti osob v souvislosti s průmyslovými a dopravními haváriemi (přímé ohrožení), nebo poruchou dodávek vody, elektřiny a plynu (nepřímé ohrožení).

Rozvoj nauky o spolehlivosti lze datovat od počátku padesátých let minulého století, tedy do období rychlého rozvoje mnoha špičkových technických odvětví (elektronika, letectví a kosmonautika, jaderná energetika apod.). Jako první byla spolehlivost aplikována na složitá zařízení pro vojenské účely.

V současnosti je teorie spolehlivosti značně propracovaná a běžně aplikovaná v různých odvětvích výroby a ostatní lidské činnosti. Aplikace spolehlivosti mají proto široké uplatnění v různých oborech lidské činnosti a jsou v současné době směřovány zejména do tří hlavních oblastí:

- *Jakost výrobků a služeb (produktů)*

Jakost výrobků a služeb je oblast, kam patří proces návrhu zařízení s požadovanou úrovní spolehlivosti, po kterém následuje ověřování spolehlivosti výrobku pomocí tzv. zkoušek spolehlivosti. Řízením procesů, které mají rozhodující vliv v otázce jakosti produktů, se zabývá management jakosti.

- *Ekonomika*

Ekonomika se soustředí na optimalizaci nákladů souvisejících se spolehlivostí a hledá kompromis mezi spolehlivostí zařízení a náklady na tuto spolehlivost. Dále uvažuje pravděpodobnostní hodnocení ekonomických rizik spojených s náhodnými poruchami zařízení – tzv. management ekonomických rizik.

- *Bezpečnost*

Oblast bezpečnosti zkoumá pravděpodobnostní hodnocení bezpečnostních rizik plynoucích z náhodných poruch technických zařízení. Tuto činnost nazýváme management bezpečnostních rizik.

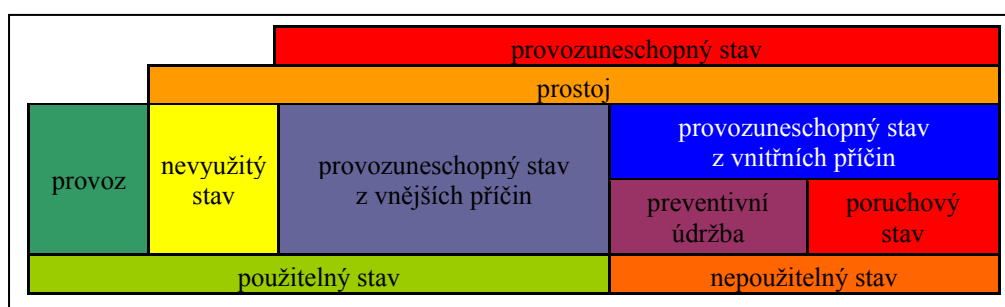
2.2 Objekty, poruchy a druhy poruch

Klíčovými termíny pro teorii spolehlivosti jsou provozuschopný a poruchový stav nějakého objektu, přičemž objektem se rozumí jakákoliv součást, zařízení, část systému, funkční jednotka, přístroj nebo systém, se kterým je možné se individuálně zabývat.

Každý takový objekt je možné charakterizovat pomocí následujících stavů, jak jsou uvedeny v [9]:

- Provoz – stav, kdy objekt plní požadovanou funkci.
- Prostoj – stav, kdy objekt neplní požadovanou funkci.
- Nevyužitý stav – prostoj objektu v použitelném stavu v době nepožadované funkce.
- Provozuneschopný stav – stav objektu charakterizovaný jeho neschopností plnit z jakýchkoliv důvodů požadovanou funkci.

Vzájemný vztah mezi těmito stavy názorně ukazuje následující obrázek.



Obr. 4 Klasifikace stavů objektu [9]

Přechod objektu z provozuschopného do provozuneschopného stavu nastává náhodně v čase. Myšlenou událostí, která tento přechod způsobí, může být vnější příčina (např. přerušení dodávky energie) nebo vnitřní příčina (preventivní údržba, porucha). Je tedy důležité, aby každá taková událost byla dostatečně analyzována a následně bylo posouzeno, zda jde o poruchu objektu.

Poruchy je možné rozlišit podle několika různých hledisek, a to zpravidla na tyto typy:

- náhlé × postupné
- částečné × úplné
- závislé × nezávislé

Pro vysvětlení jednotlivých typů poruch jsou podle [9] platné následující definice:

- Porucha – ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci.
- Postupná porucha – porucha způsobená postupnou změnou daných charakteristik objektu v čase.
- Náhlá porucha – porucha, která nemohla být očekávána na základě předchozího zkoumání nebo sledování.
- Částečná porucha – porucha způsobující neschopnost objektu plnit některé, nikoliv však všechny požadované funkce.
- Úplná porucha – porucha způsobující úplnou neschopnost objektu plnit všechny požadované funkce.
- Závislá porucha – porucha objektu způsobené buď přímo, nebo nepřímo poruchou nebo poruchovým stavem jiného objektu.
- Nezávislá porucha - porucha objektu, nezpůsobená přímo ani nepřímo poruchou nebo poruchovým stavem jiného objektu.

U jednotlivých zařízení (objektů), lze vypočítat střední dobu do poruchy a pomocí ní potom parametry statistického rozdělení. Toto rozdělení se používá jak pro popis doby do poruchy, tak pro popis doby do obnovy objektu. Nejčastěji používaným pravděpodobnostním rozložením je exponenciální. K zavedení těchto pojmů je potřeba uvést několik poznatků z matematické pravděpodobnosti a statistiky.

3 Úvod do teorie pravděpodobnosti

3.1 Základní pojmy teorie pravděpodobnosti

Teorie pravděpodobnosti je matematická disciplína, která se zabývá studiem náhodných jevů a veličin. Pro hromadný náhodný jev (děj) platí, že výsledek takového děje není jednoznačně určen (je tedy stochastický) a teoreticky je možné tento děj mnohokrát opakovat.

Náhodný, hromadný děj, jehož výsledek není jednoznačně určen okolnostmi, se označuje jako stochastický pokus. Naopak výsledek deterministického pokusu je jednoznačně určen okolnostmi, za kterých daný pokus nastal.

Náhodným pokusem tedy rozumíme takové pokusy, které je možné neomezeně mnohokrát opakovat, ale jejichž výsledek není jednoznačně předurčen podmínkami pokusu a náhodně se mění i přes to, že podmínky pokusu jsou zachovány.

K popisu náhodného pokusu je nutno stanovit množinu všech možných výsledků náhodného pokusu. Aby bylo vždy možné jednoznačně určit, který z výsledků nastal, musí být možné výsledky zavedeny tak, aby byly vzájemně neslučitelné, tj. aby žádné dva z nich nemohly nastat současně. Dále musí být množina možných výsledků úplná, tzn., že při realizaci pokusu musí právě jeden z nich vždy nastat. Tyto možné výsledky náhodného pokusu potom nazýváme elementárními jevy.

Úplnou množinu všech možných výsledků při daném pokusu nazýváme základním jevovým prostorem (elementárních jevů) a označujeme ji Ω . Náhodným jevem se potom rozumí jakýkoliv jev, který je podmnožinou Ω . Jinak řečeno, náhodným jevem rozumíme jakékoliv tvrzení o výsledku náhodného pokusu, o kterém lze po ukončení pokusu jednoznačně rozhodnout, zda je či není pravdivé.

3.2 Náhodná veličina

Výsledek náhodného pokusu může být vyjádřen číselně (kvantitativně) nebo slovně (kvalitativně) pomocí náhodné proměnné, která může nabývat spojitých nebo diskrétních hodnot. Spojitá náhodná veličina může nabýt jakékoliv hodnoty z určitého intervalu. Diskrétní veličiny mohou nabývat pouze spočetného počtu hodnot.

3.3 *Zákony rozdělení pravděpodobnosti*

Zákon rozdělení pravděpodobnosti je vztah, který dovoluje stanovit, s jakou pravděpodobností lze při realizaci pokusu očekávat nastoupení daného jevu (tj. přiřadit hodnotám náhodné proměnné odpovídající pravděpodobnosti).

V teorii spolehlivosti se používá několik typů pravděpodobnostních rozdělení, přičemž se rozlišují veličiny spojité a diskrétní.

Pro spojité náhodné proměnné se používá:

- normální (Gaussovo) rozdělení
- logaritmicko-normální rozdělení
- exponenciální rozdělení
- Weibullovo rozdělení

Pro diskrétní náhodné proměnné potom:

- binomické rozdělení
- Poissonovo rozdělení.

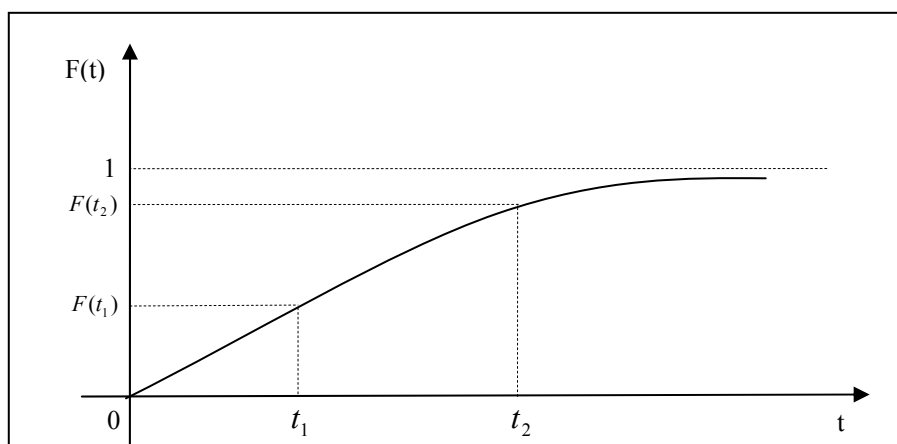
3.4 *Distribuční funkce*

Distribuční funkce je jednou z možností, jak popsat rozdělení náhodné proměnné. Distribuční funkcí náhodné proměnné T v intervalu $(0, \infty)$ rozumíme funkci $F(t)$ definovanou vztahem: $F(t) = P(T \leq t)$. Pokud náhodná veličina nabývá záporných hodnot, uvažuje se interval $(-\infty, \infty)$.

Hodnota funkce $F(t)$ v bodě t tedy vyjadřuje pravděpodobnost toho, že náhodná proměnná T nabude hodnoty menší nebo rovné t .

Distribuční funkce má následující vlastnosti (uvažuje se časová oblast):

- $0 \leq F(t) \leq 1$
- neklesající, zprava spojitá pro diskrétní náhodné veličiny, oboustranně spojitá pro spojité náhodné veličiny
- s limitami: $\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0$ $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$



Obr. 5: Příklad grafu distribuční funkce v časové oblasti

Na základě uvedených vlastností distribuční funkce lze také odvodit důležitý vztah pro pravděpodobnost toho, že náhodná proměnná nabude hodnoty z jistého intervalu $T \in (t_1, t_2)$:

$$P(t_1 < T \leq t_2) = F(t_2) - F(t_1)$$

Tento vztah říká, že pravděpodobnost toho, že náhodná proměnná nabude hodnoty z daného intervalu je rovna rozdílu hodnot distribuční funkce $F(t)$ v krajních bodech tohoto intervalu.

Ve spolehlivosti se používá doplněk (komplement) k distribuční funkci, který nazýváme funkce spolehlivosti (bezporuchovosti), protože vyjadřuje pravděpodobnost toho, že jev (např. porucha) do okamžiku t nenastane. V teorii spolehlivosti se pomocí distribuční funkce vyjadřuje pravděpodobnost nastoupení poruchy.

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t)$$

3.5 Hustota pravděpodobnosti

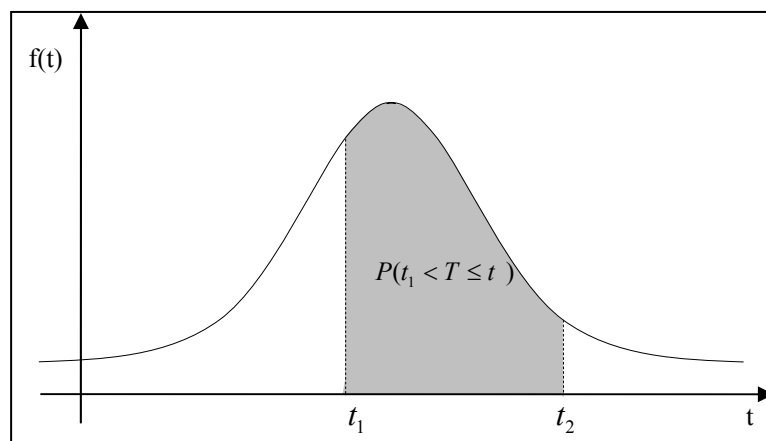
Zákon rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné může být také vyjádřen pomocí hustoty pravděpodobnosti, která charakterizuje tzv. rozdělení spojitého typu. V diskrétní oblasti nahrazuje hustotu pravděpodobnosti tzv. pravděpodobnostní funkce. Náhodná proměnná T má rozdělení spojitého typu, existuje-li nezáporná reálná funkce $f(t)$ taková, že pro všechna reálná t se dá distribuční funkce $F(t)$ vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{dF(t)}{dt} = f(t) \quad \text{z toho plyne} \quad F(t) = \int_0^t f(t)dt, \text{ kde funkce } f(t) \text{ se nazývá}$$

hustota pravděpodobnosti náhodné proměnné t .

Hustota pravděpodobnosti má následující vlastnosti (uvažuje se časová oblast):

- $\int_0^{\infty} f(t)dt = 1$
- $P(t_1 < T \leq t_2) = F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt$, pro \forall reálná čísla $t_1 < t_2$
- $P(T = t) = 0$



Obr. 6: Příklad grafu hustoty pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny

Graf hustoty pravděpodobnosti nám poskytuje dobrou představu o tom, kterých hodnot náhodná proměnná může nabývat častěji (s vyšší pravděpodobností) a kterých méně často.

3.6 Intenzita náhodného jevu

Intenzita náhodného jevu (hazard function) je definována jako podmíněná pravděpodobnost toho, že jev nastane během nekonečně malého intervalu dt za podmínky, že do okamžiku začátku tohoto intervalu jev nenastal. Tuto podmíněnou pravděpodobnost lze vyjádřit vztahem:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

Intenzita jevu může být v závislosti na hodnotě náhodné proměnné konstantní nebo proměnná. Ve spolehlivosti je velmi často užívaná intenzita poruch v analýzách bezporuchovosti. Jde o pravděpodobnost, že dojde k poruše zkoumaného objektu za časovou jednotku po daném okamžiku. Přitom se předpokládá, že do tohoto okamžiku k poruše nedošlo.

3.7 Exponenciální rozdělení

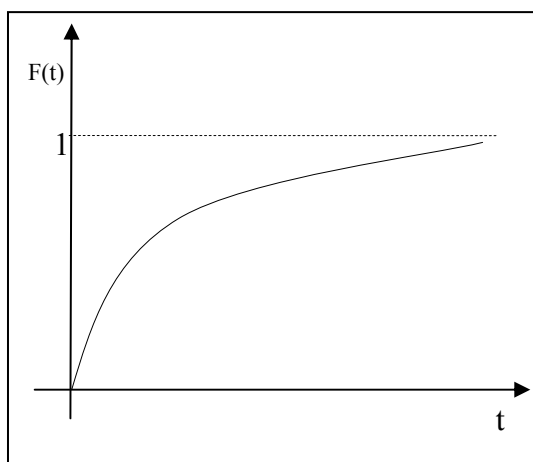
Exponenciální typ rozdělení se používá nejen ve spolehlivosti, ale také v teorii hromadné obsluhy, v teorii obnovy apod. Obecně lze říci, že se exponenciální rozdělení používá k vyjádření doby do výskytu nějaké události (například poruchy) nebo doby mezi výskyty dvou po sobě jdoucích nezávislých událostí. Využívá se zejména pro popis bezporuchovosti takových objektů, kde se neprojevuje vliv postupného stárnutí součástí, což znamená, že nezáleží na minulosti. Proto lze exponenciální rozložení nazývat jako rozložení „bez paměti“.

Exponenciální rozdělení se nejčastěji používá jako jednoparametrové s parametrem λ , který vyjadřuje intenzitu poruch. Přitom platí podmínka $\lambda > 0$. Používá se pro popis poruchovosti objektů s konstantní intenzitou poruch (neprojevuje se vliv postupné degradace součástí).

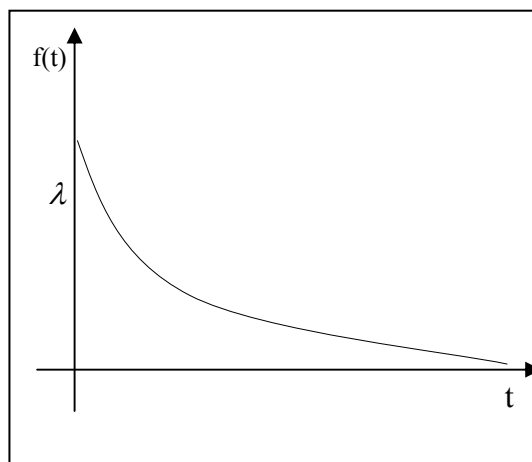
- Hustota pravděpodobnosti: $f(t) = \lambda e^{-\lambda \cdot t}$
- Distribuční funkce: $F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$
- Doplněk distribuční funkce – funkce spolehlivosti (bezporuchovosti)

$$R(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$$

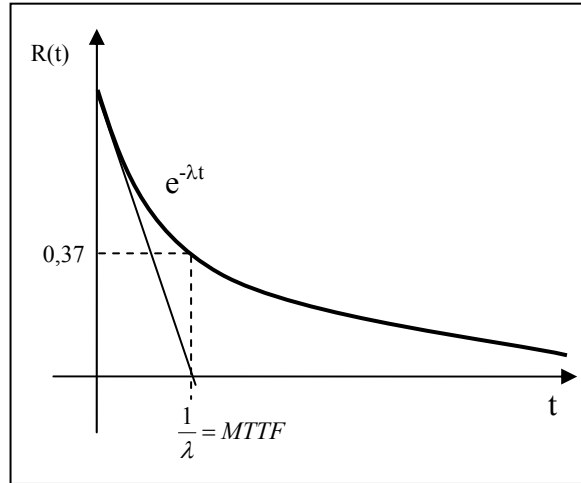
$$F(t) = \lambda \cdot t, \text{ za předpokladu, že } \lambda \cdot t \ll 1$$



Obr. 8: Distribuční funkce pro exponenciální rozdělení



Obr. 7: Hustota pravděpodobnosti pro exponenciální rozdělení



Obr. 9: Funkce spolehlivosti

3.8 Logaritmicko-normální rozdělení

Logaritmicko-normálním rozdělením se podle [2] řídí doba aktivní opravy po poruše. Doba aktivní opravy je dobou skutečně rozloženou na všechny pracovníky údržby. Platí přitom předpoklad, že jsou dostupné veškeré nezbytné nástroje, náhradní díly

a dokumentace. Log-normální rozdělení mají data, která jsou jednostranně ohraničena, tzn. mají definovaný počátek (čas, teplota).

Log-normální rozdělení dob do obnovy zařízení vyžaduje pro svou identifikaci dva parametry:

- Medián $ACMT_{50}$ - je taková hodnota, kdy 50 % doby opravy leží pod a 50 % nad ní
- Směrodatná odchylka σ - indikuje vzájemný poměr krátkých, středních a dlouhých dob oprav

Přitom platí následující vztahy:

$$ACMT_{50} = e^{\mu}$$

$$MACMT = ACMT_{50} \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2}}$$

To umožňuje pro známou hodnotu σ převést požadavek na MACMT na medián a naopak.

Hustota pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení je dána vztahem:

$$f(t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}; t \geq 0, \sigma > 0$$

Distribuční funkce se vypočte jako $F(t) = \int_0^t f(t)dt$. Výsledek je možné podle [11]

zapsat jako:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right]$$

Pozn.: Význam funkce *erf* je možné nalézt v [12], nebo v nápovědě MS Excel.

Funkce bude využita k vykreslení průběhu distribuční funkce v tomto programu.

4 Ukazatele spolehlivosti

Analýzy spolehlivosti se používají k přezkoumání a předpovědi ukazatelů pohotovosti, bezporuchovosti, udržitelnosti a bezpečnosti systému. Tyto analýzy se označují jako prediktivní a jejich metody jsou také široce uplatňovány při hodnocení rizika, neboť podstata jejich použití je shodná. Analýzy spolehlivosti se provádí v etapách volby koncepce a stanovení požadavků, návrhu a vývoje a v etapě provozu a údržby. Pomocí těchto analýz lze vyhodnotit a stanovit ukazatele spolehlivosti a následně posoudit, zda byly splněny specifikované požadavky.

Veličiny, které se při hodnocení spolehlivosti používají, jsou náhodného charakteru, a proto je nutné při jejich zpracování využít poznatků teorie pravděpodobnosti. Při určování hodnot ukazatelů spolehlivosti se pak uplatňují metody matematické statistiky, protože ukazatele spolehlivosti úzce souvisí s rozložením pravděpodobnosti náhodné proměnné.

Ukazatele spolehlivosti lze podle definice spolehlivosti rozdělit na:

- Ukazatele bezporuchovosti
- Ukazatele pohotovosti
- Ukazatele udržitelnosti

4.1 Ukazatele bezporuchovosti

4.1.1 Pravděpodobnost bezporuchového provozu

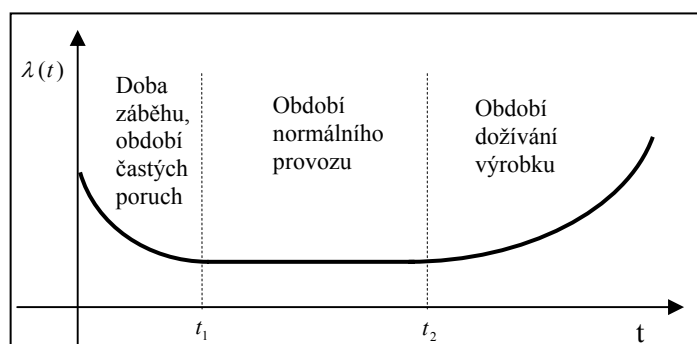
Pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t_1, t_2)$ je pravděpodobnost, že objekt může plnit požadovanou funkci v daných podmínkách v daném časovém intervalu (t_1, t_2) . Obecně se předpokládá, že objekt je ve stavu schopném plnit požadovanou funkci na začátku časového intervalu.

4.1.2 (Okamžitá) Intenzita poruch

Intenzita poruch λ je rovna limitě poměru podmíněné pravděpodobnosti, existuje-li, že časový okamžik T vzniku poruchy objektu leží v daném časovém intervalu $(t, t+\Delta t)$ k délce časového intervalu Δt jestliže Δt se blíží nule, za podmínky, že na začátku časového intervalu je objekt v použitelném stavu. [9]

$$\lambda = h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)}$$

Empiricky bylo zjištěno, že průběh $\lambda(t)$ během celého technického života objektu odpovídá tzv. vanové křivce.



Obr. 10: Průběh vanové křivky

V počátečním stadiu funkčního života zařízení je vyšší hodnota intenzity poruch, která je způsobena neodhalenými nedostatky v konstrukci, výrobě a montáži. Intenzita poruch postupem času klesá, naopak pohotovost objektu roste. Toto období se nazývá doba záběhu. Od okamžiku t_1 se intenzita poruch udržuje po delší dobu na stabilní nízké úrovni – tzv. období normálního provozu. Poté, od času t_2 začíná křivka intenzity poruch, z důvodu stárnutí, opět růst. Poslední fáze se nazývá období dožívání.

4.1.3 Střední doba do poruchy

Střední doba provozu do poruchy $E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt$ se u neopravovaných objektů označuje zkratkou MTTF z anglického Mean Time To Failure. Pro exponenciální rozdělení se vypočte jako $MTTF = \frac{1}{\lambda}$. Pro objekty opravované je obdobně definována střední doba mezi poruchami MTBF (Mean Time Between Failures).

4.2 Ukazatele pohotovosti

Ukazatele pohotovosti lze využít pouze pro opravované objekty. Podobně jako u bezporuchovosti se pro konstantní intenzitu poruch používá λ , pro konstantní intenzitu oprav se používá μ .

Funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ resp. nepohotovosti $U(t)$ je pravděpodobnost, že objekt je, resp. není ve stavu schopném plnit v daných podmínkách a v daném časovém okamžiku požadovanou funkci, za předpokladu, že požadované vnější prostředky jsou zajištěny. Funkce okamžité pohotovosti nabývá hodnot z intervalu $(0;1)$.

Zjednodušeně funkce okamžité pohotovosti udává pravděpodobnost, s jakou bude výrobek fungovat. Funkce okamžité pohotovosti je velice často blízká 1, neboť technická zařízení jsou konstruována s cílem dosáhnout vysoké MTBF, zatímco hodnota MTTR má být co nejnižší. Průběh funkce okamžité pohotovosti závisí na počátečním stavu objektu. Je-li v čase $t=0$ objekt ve funkčním stavu, potom je hodnota okamžité pohotovosti rovna 1.

Okamžitá pohotovost objektu, za předpokladu exponenciálního rozložení doby do poruchy/opravy, se spočítá jako:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

V praxi se používá asymptotická pohotovost ($t \rightarrow \infty$):

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

4.3 Ukazatele udržovatelnosti

Udržovatelnost je schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo vrátit se do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy a zdroje. Hlavní ukazatele udržovatelnosti jsou následující:

- Střední doba trvání údržby
- Střední doba trvání do opravy
- Střední pracnost údržby
- Střední pracnost opravy

5 Základní metody analýzy spolehlivosti

Základní metody spolehlivosti jsou standardizovány a návody k jejich použití nalezneme ve formě národních, mezinárodních či vojenských norem.

Pro provádění systematické a reprodukovatelné analýzy spolehlivosti systému je nezbytné používat jednotné postupy. Pro daný konkrétní případ je nutno zvolit vhodnou analytickou metodu, která umožňuje modelovat a hodnotit problémy spolehlivosti v dostatečném rozsahu, provádět přímou, systematickou, kvalitativní a kvantitativní analýzu a předpovědět číselné hodnoty ukazatelů spolehlivosti.

Zpravidla však žádná jednotlivá metoda není natolik vyčerpávající, aby pokryla všechna kritéria požadovaná pro hodnocení konkrétního systému. Proto bývá často třeba použít několika metod najednou. Zvolí se jedna základní metoda, která je rozšířena metodami doplňkovými tak, aby bylo dosaženo potřebného pokrytí zkoumaného systému. V současné praxi se při provádění analýz spolehlivosti můžeme setkat zejména s následujícími metodami:

Předpověď bezporuchovosti výpočtem z dílů (PC - Path county) je induktivní metoda (zdola nahoru) vhodná k odhadu přibližné intenzity poruch systému za předpokladu, že jeho poruchu způsobí porucha libovolného prvku (tzv. sériový poruchový model).

Analýza stromu poruchových stavů (FTA - Fault tree analysis) je deduktivní (shora dolů) analýza prováděná ve tvaru stromového diagramu. Používá se k určení příčin poruchových stavů částí systému nebo vnějších jevů nebo jejich kombinací, které by mohly vést ke stanovenému poruchovému stavu systému.

Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA - Fault mode, effects and criticality analysis) je analýza potenciálně možných druhů a důsledků poruchových stavů

s uvážením pravděpodobnosti jejich výskytu a uspořádáním podle stupně závažnosti poruchových stavů (závažnost důsledků je posuzována podle specifikované stupnice). FMECA je rozšířením metody FMEA, která jí zpravidla předchází.

Metoda statistického modelování se používá většinou ke kvantitativním analýzám. Je založena na vytvoření tzv. stochastického algoritmu, který vyjadřuje závislost výstupní náhodné veličiny (například doby do poruchy systému) na vstupních náhodných veličinách (například dobách do poruchy, dobách obnovy provozuschopnosti apod.) všech prvků systému. Příkladem takové metody je **Markovova analýza** (MA - Markov analysis). Je to převážně induktivní metoda založená na teorii Markovových řetězců. Pomocí matematických modelů se při ní vyhodnocují pravděpodobnosti, že prvky systému jsou v určitém (funkčním) stavu nebo že nastanou určité události ve specifikovaných časových bodech (příp. intervalech).

6 Analýza způsobů a důsledků poruch

6.1 *Stručný historický přehled*

Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA (Fault Mode and Effects Analysis) byla prvně použita americkou armádou v roce 1949 pro klasifikaci poruch podle toho, jaký úspěch měly jejich mise, jaká byla bezpečnost vojáků, nebo stav vybavení. FMEA byla také uplatněna v programu Apollo v 60. letech. V průběhu 70. let americké ministerstvo obrany vydalo a revidovalo vojenskou normu MIL-STD-1629A, která zobecnila získané zkušenosti a zformulovala základní zásady pro provádění a použití metody.

V 80. letech použila automobilová společnost Ford analýzu FMEA ke snížení rizik při výrobě modelu Pinto. Později kolem roku 1990 automobilové společnosti společně vyvinuly standardy FMEA.

V roce 1985 Mezinárodní elektrotechnická komise IEC (International Electrotechnical Commission) vydala normu IEC 812 - Procedure for Failure Mode and Effects Analysis, která byla v roce 1992 zavedena také u nás jako ČSN IEC 812 (010675) – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch.

6.2 *Definice FMEA/FMECA podle ČSN ISO 50(191)*

„Analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů (FMECA - Fault modes, effects and criticality analysis) je kvalitativní metoda analýzy bezporuchovosti, obsahující analýzu druhů a důsledků poruchových stavů spolu s uvážením pravděpodobnosti jejich výskytu a uspořádání podle stupně závažnosti poruchových stavů.“

„Analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků (FMEA – Fault modes and effects analysis) je kvalitativní metoda analýzy bezporuchovosti, obsahující studium druhů poruchových stavů, které mohou existovat v každé části objektu, a určení důsledků každého druhu poruchového stavu na jiné části objektu a na požadované funkce objektu.“

6.3 Druhy analýzy

Analýza možností vzniku poruch a jejich následků se používá ve formách:

- Analýza konstrukčního provedení

Zkoumá všechna možná selhání hodnoceného systému nebo jeho částí. Vychází z funkcí, které mají součásti systému. Příčiny vad mohou být konstrukčního i výrobního charakteru.

- Analýza výrobního procesu

Vychází z výčtu všech potenciálních poruch procesu výroby a montáže a jejich příčin. Rozdíl od konstrukční FMEA vysvětluje příklad:

- „chybí vrtaný otvor“- FMEA konstrukce
- „zlomený vrták“ – FMEA procesu

- Analýza výrobku

Zkoumá konstrukci a výrobní proces vcelku, analyzuje a zlepšuje obojí v jedné FMEA. Tato metoda se používá ve formě „FMEA nakupovaného dílu“. Je iniciována a řízena zákazníkem.

FMEA je nejčastěji používanou metodou v mnoha podnicích. Těsné dodavatelsko-odběratelské vztahy mezi jednotlivými stupni zpracování výrobku vyžadují neustále snižovat pravděpodobnost vzniku poruch. Existence mezioperačních zásob se stále zkracuje (měří se v hodinách), a i proto se zvyšuje důraz na bezporuchovost výroby. Zavedení systémů Just-in-Time, použití karet Kanban nebo podobných nástrojů, které slouží k minimalizaci výrobních zásob, vyžaduje bezporuchové produkty. Nesplnění bezpečnostních předpisů z důvodu výskytu poruch, má za následek nárůst ztrát, popřípadě poškození dobrého jména společnosti, což je pro podnik nepřijatelné. FMEA je metoda, jejímž použitím je možno zabránit vzniku poruchy, popřípadě zmírnit rizika, která vznikají při vývoji výrobku, v technologii výroby i při samotné výrobě.

6.4 Účel analýzy FMEA

Účelem jednotlivých typů FMEA je rozeznat v různých stádiích tvorby výrobku co nejdříve možnosti vzniku poruch, určit jejich možné následky, ohodnotit rizika a bezpečně jim předcházet. Jednotlivé druhy FMEA spolu souvisí a vycházejí jeden

z druhého. Všem druhům analýzy je společné, že musí zobrazovat skutečný stav, a proto je nutné je neustále aktualizovat.

Pro správné provedení FMEA je potřeba pochopit strukturu systému. FMEA umožňuje nalézt faktory ovlivňující spolehlivost a identifikuje rizikovější nebo citlivější komponenty systému. Analýza způsobů a důsledků poruch má zaručit zjištění potenciálních rizik a druhů poruch, identifikovat rizikové stavy a stanovit, jak porucha ovlivní bezpečnost a použitelnost sledovaného systému.

Jedná se o kvalitativní metodu analýzy bezporuchovosti s tzv. induktivním přístupem (postupuje se od nejjednodušších prvků analyzovaného systému směrem k nadřazeným systémům). Metoda FMEA obsahuje studium potenciálně možných druhů poruchových stavů (např. materiálů, součástek, zařízení), které mohou existovat v jakýchkoli částech systému. Dále se určují a vyhodnocují možné důsledky každého druhu poruchového stavu na nejbližší vyšší funkční úrovni systému. Opakování tohoto postupu vede ke zjištění všech druhů poruchových stavů systému. Smysl spočívá ve specifikaci všech možných poruch a zajištění co největší spolehlivosti výrobku. Spolehlivostí se rozumí schopnost výrobku plnit funkci, pro níž je zkonstruován, v předpokládaných technických podmínkách. Spolehlivost je komplexní vlastností. Zahrnuje faktory bezporuchovosti, životnosti, udržitelnosti. Jelikož je spolehlivost složena z více vlastností, nelze ji jednoznačně vyjádřit například číselnou hodnotou. Proto se využívají ukazatele spolehlivosti. Jejich určení je základní úlohou v analýzách spolehlivosti. Pro výpočet spolehlivosti je důležitá znalost výpočtů pravděpodobnosti a statistiky.

Analýza FMEA může být provedena společně s analýzou kritičnosti, což je pak souhrnně označováno jako analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA). FMECA je tedy rozšířením metody FMEA, která jí zpravidla předchází.

Účelem analýzy kritičnosti je klasifikovat každý potenciální druh poruchy, identifikovaný ve FMEA, současně podle pravděpodobnosti výskytu a závažnosti vlivu poruchy. Kritičnost každého druhu poruchy se vyhodnocuje z hlediska důsledků na funkci systému a bezpečnost procesu, přičemž se vždy konzervativně počítá s nejhoršími možnými následky.

Metodu FMECA lze považovat za základní metodu managementu spolehlivosti. Je důležitá při etapě návrhu zařízení, kde umožňuje jeho přezkoumání.

Základem metody je stanovení vzniku možných poruch u daného návrhu, ohodnocení jejich rizikovosti a navržení takových opatření, která vedou ke splnění

podmínek z hlediska spolehlivosti i jakosti. Všechny tyto činnosti zpravidla provádí kvalifikovaný tým odborníků. Analýza FMECA probíhá v následujících etapách:

- **Analýza současného stavu.** Shromažďují se požadavky a informace týkající se subsystému a jeho základních charakteristik a funkcí. Pomáhá k získání vstupních údajů, které se použijí v dalších etapách.
- **Kvalitativní analýza,** jejíž cílem je hodnocení současného stavu. S ohledem na cíle a dostupné materiály jsou stanoveny vhodné postupy analýzy (matematické či fyzikální modelování, testování atd.) a také úměrný rozsah analýzy.
- **Semikvantitativní analýza** se hodnotí možné poruchy z hledisek pravděpodobnosti výskytu, významu poruchy a z hlediska pravděpodobnosti odhalené poruchy. Hodnocení se často provádí bodovou stupnicí 1 až 10. Po stanovení vybraných bodových hodnot (nejčastěji výskyt, význam a odhalitelnost) se jako součin těchto hodnot pro každou možnou poruchu vyvolanou určitou příčinou vypočte tzv. číslo priority rizika. Toto číslo slouží k určení nejrizikovějších možných poruch a označuje se jako RPN. Výpočet koeficientu rizika je uveden v kapitole [6.5] určení čísla priority rizika v analýze FMECA. Pro složité systémy je obtížné kvantitativní analýzu vypracovat bez použití výpočetní techniky a speciálního softwaru.
- **Syntéza výsledků** analýzy umožní navrhnout opatření, která se zpracovávají pro skupinu nejrizikovějších prvků systému. Po realizaci nápravných opatření se opětovně hodnotí míry rizika jednotlivých možných vad, na které byla příslušná opatření zaměřena.

FMECA by měla být naplánována a ukončena souběžně s návrhem změn tak, aby v návrhu byla zohledněna doporučení plynoucí z analýzy. Výsledky a aktuální stav FMECA se uvádějí u všech posouzení návrhu a jsou vstupními daty pro jeho alternativy, techniku řízení bezpečnosti a údržby, pro udržitelnost, analýzu logistické podpory, projektování zkušební techniky a pro naplánování zkoušek.

6.5 Určení čísla priority rizika v analýze FMECA

Číslo priority rizika RPN je mírou celkového rizika každé možné příčiny poruchy a umožňuje porovnání různých poruch pomocí jednotného měřítka. K určení čísla priority rizika se doporučuje stanovit výskyt, význam a odhalitelnost jednotlivých druhů poruch.

Výskyt poruchy (Occurrence - *O*) – určuje pravděpodobnost, že se porucha vyskytne. Tato veličina může být též definována jako klasifikační číslo, které odpovídá skutečné pravděpodobnosti výskytu. Tato pravděpodobnost se často oceňuje pomocí bodové stupnice od 1 (nepravděpodobný výskyt) do 10 (velmi pravděpodobný výskyt). Pravděpodobnost výskytu poruchy musí být posuzována nezávisle na významu poruchy nebo na pravděpodobnosti jejího odhalení. Pravděpodobnost vzniku poruchy lze stanovit např.:

- z výsledků sledování spolehlivosti během provozu
- z výsledků provedených zkoušek spolehlivosti
- z výsledků sledování provozní spolehlivosti konstrukčně podobných prvků
- expertním odhadem s využitím znalostních databází

Závažnost poruchy (Severity - *S*) – tj. odhad, jak silně budou důsledky poruchy ovlivňovat systém nebo uživatele se hodnotí také stupnicí od 1 (nejméně významná) do 10 (velmi závažná – ohrožující bezpečnost). Při hodnocení se nebere v úvahu pravděpodobnost výskytu ani pravděpodobnost odhalení poruchy. Poruchy, které mají obdobné důsledky, jsou ohodnoceny stejně. Systém hodnocení je nutné přizpůsobit důsledkům poruch konkrétního objektu, pro který se analýza provádí. Znamená to, že je třeba rozlišit, pokud je důsledkem finanční ztráta, nebo působení na zákazníky (ohrožení obyvatel). Následně se závažnost všech poruch vyhodnotí na základě konkrétního důsledku, popřípadě lze do hodnocení zahrnout všechny možné důsledky, vždy s odpovídající stupnicí.

Odhalení poruchy (Detection - *D*) – znamená ohodnotit (např. stupni 1 až 10) pravděpodobnost odhalení poruchy dříve, než se dostane k zákazníkovi nebo dalšímu zpracovateli. Zpravidla platí, že čím vyšší je detekční číslo, tím méně je pravděpodobné, že dojde k detekci. Nižší pravděpodobnost detekce vede k vyššímu číslu RPN a vyšší prioritě řešení daného způsobu poruch. Nebere se v úvahu žádný z předchozích ukazatelů. Při hodnocení se předpokládá, že k poruše došlo a hodnotí se účinnost preventivních opatření k odhalení poruchy.

V tab. 1-3 jsou uvedeny stupnice hodnocení výskytu, závažnosti a odhalitelnosti podle [9]. Jednotlivé způsoby hodnocení jsou ukázány tak, jak se používají v automobilovém průmyslu. Vždy platí, že čím nižší klasifikační číslo, tím nižší jsou důsledky jednotlivých kritérií. Rozsah stupnice pro každé kritérium lze individuálně přizpůsobit každé oblasti hodnocení. Nemusí tedy být vždy totožný.

Tab. 1: Hodnocení výskytu poruchy u FMEA procesu [9]

Pravděpodobnost výskytu poruchy	Možný výskyt poruchy	Klasifikace
Zanedbatelná: U téměř identických procesů nebyla porucha nikdy zaznamenána.	1 z 1 500 000	1
Velmi nízká: U téměř identických procesů se poruchy vyskytovaly pouze ojediněle.	1 z 150 000	2
Nízká: U podobných procesů se vyskytovaly pouze občasné poruchy.	1 z 15 000	3
Průměrná: Odpovídající podobným předcházejícím procesům, u kterých se občas vada vyskytla, ale ne ve významném rozsahu.	1 z 2000	4
	1 z 400	5
	1 z 80	6
Vysoká: Odpovídající předcházejícím procesům, u kterých často docházelo k výskytu poruch.	1 z 20	7
	1 z 8	8
Velmi vysoká: Porucha je téměř nevyhnutelná.	1 z 3	9
	≥ 1 z 2	10

Tab. 2: Hodnocení závažnosti poruchy u FMEA procesu [9]

Následky poruchy	Význam poruchy	Klasifikace
Žádná	Žádný zjištělý následek.	1
Velmi málo významná	Menší porucha na výrobní lince, část výrobků bude muset být přepracována, ale bez narušení výrobního cyklu. Ozdobné a tlumicí prvky neodpovídají. Vadu zaznamená náročný zákazník.	2
Málo významná	Menší porucha na výrobní lince, část výrobků (méně než 100 %) bude muset být přepracována, ale mimo výrobní cyklus. Ozdobné a tlumicí prvky neodpovídají. Vadu zaznamenává průměrný zákazník.	3
Velmi nízká	Menší porucha na výrobní lince, výrobek musí být tříděn a část (méně než 100 %) pak přepracována. Ozdobné a tlumicí prvky neodpovídají. Poruchu zaznamenává většina zákazníků.	4
Nízká	Menší porucha na výrobní lince, 100 % výrobků musí být přepracováno. Výrobek je funkční, ale části zajišťující pohodlí mají sníženou úroveň. Zákazník pociťuje určité neuspokojení.	5
Střední	Menší porucha na výrobní lince, část výrobků se musí vyřadit (bez třídění). Výrobek je funkční, ale části zajišťující pohodlí jsou nefunkční. Zákazník pociťuje nepohodlí.	6
Vysoká	Menší porucha na výrobní lince, méně než 100 % neshodných výrobků, výrobky musí být vyříděny. Výrobek funkční, ale s omezením. Zákazník je nespokojen.	7
Velmi vysoká	Významná porucha na výrobní lince, 100 % výrobků neshodných. Výrobek nefunkční se ztrátou hlavní funkce. Zákazník je velmi nespokojen.	8
Nebezpečná s varováním	Může ohrozit pracovníka obsluhy zařízení nebo montáže. Porucha nastane s výstrahou a ohrožuje bezpečnost nebo dodržení zákonných požadavků.	9
Nebezpečná bez varování	Může ohrozit pracovníka obsluhy zařízení nebo montáže. Porucha nastane bez výstrahy a ohrožuje bezpečnost nebo dodržení zákonných požadavků.	10

Tab. 3: Hodnocení odhalitelnosti poruchy u FMEA procesu [9]

Odhalitelnost	Pravděpodobnost, že porucha nebo její příčina budou odhaleny před další operací nebo předtím, než produkt opustí místo výroby.	Klasifikace
Téměř jistá	Stávající kontroly téměř jistě poruchu odhalí.	1
Velmi vysoká	Velmi vysoká pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	2
Vysoká	Je vysoká pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	3
Středně vysoká	Mírně nadprůměrná pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	4
Střední	Průměrná pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	5
Nízká	Nízká pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	6
Velmi nízká	Velmi nízká pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	7
Zanedbatelná	Zanedbatelná pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	8
Velmi zanedbatelná	Velmi zanedbatelná pravděpodobnost, že stávající kontroly poruchu odhalí.	9
Absolutně nemožná	K odhalení poruchy nejsou k dispozici žádné známé kontroly.	10

Číslo priority rizika, vznikající z možné poruchy se vyjadřuje hodnotou RPN jako součin:

$$RPN = O \cdot S \cdot D$$

RPN se používá při hodnocení stavu po analýze FMECA. Podle RPN se stanoví zaměření na zmírnění následků poruch. Čím vyšší je RPN, tím více je potřeba se zaměřit na odstranění příslušných příčin poruchy. Jestliže existují způsoby poruch s podobným nebo totožným číslem RPN, mají se způsoby snížení RPN zaměřit na ty způsoby poruch, které mají vyšší čísla závažnosti S .

6.6 Příklad dokumentace FMECA

Metoda FMECA se průběžně zaznamenává do přehledné tabulky, která je obvykle sestavována při tzv. brainstormingu. Brainstorming je metoda týmové práce, která zvyšuje účinnost tvůrčího myšlení. Cílem je získat co nejvíce nápadů k řešenému problému (např. zjištění možných poruch), které budou později analyzovány. Při brainstormingu tým generuje všechny možné i málo pravděpodobné poruchy a problémy, vztahující se k výrobku nebo procesu. Těmto poruchám tým přiřazuje potenciální důsledky a příčiny. Poté následuje hodnocení výskytu, významu a odhalitelnosti problémů pomocí číselných koeficientů.

Tab. 4: Příklad formuláře pro FMECA procesu: Stříhání plechu pro výrobu svařovaných dílů [7]

Funkece procesu	Možná porucha	Možné náhledky poruchy	význam	možné příčiny	výskyt	stávající způsoby kontroly	odhalitelnost	RPN	doporučená opatření	Provedená opatření	výskyt	význam	odhalitelnost	RPN
Stříhání plechu	Nesprávný rozměr	Nelze provádět další operace. Materiál je nepoužitelný	8	Nesprávné nastavení dorazu	3	Kontrola na počátku směny	6	144	zavést kontrolu 1x za hodinu	kontrolní postup zaveden	8	3	3	72
				Chybné měření	2	Kontrola na počátku směny	6	96	žádné					
	Deformace	Nejde svařovat. Špatný vzhled	7	Špatné seřízení nůžek	3	kontrola rovinnosti 1x za hodinu	4	84	žádné					
				Otupení břitů	6	kontrola rovinnosti 1x za hodinu	4	168	použít jiný materiál břitů	použít materiál ...	7	2	4	56
	Otrěpy	Poranění obsluhy. Špatný vzhled	9	Špatné seřízení nůžek	3	vizuální kontrola	4	108	žádné					
				Otupení břitů	6	vizuální kontrola	4	216	použít jiný materiál břitů	použít materiál ...	9	2	4	72

6.7 Shrnutí analýzy FMECA:

- Metoda je široce použitelná v rozmanitých účelových aplikacích. Provádět analýzu je možné v různých obdobích života analyzovaného systému od etapy vývoje (vždy, když vývoj výrobku dospěl do stavu vyžadujícího rozhodnutí o dalším postupu řešení nebo v případech, kdy je nutno ohodnotit vliv navrhovaných změn), až po etapu provozu a následné vypořádání.
- Jde o velmi účinný prostředek prokazování dostatečné úrovně bezporuchovosti a bezpečnosti analyzovaného systému ze strany dodavatele zákazníkovi.
- Je možné formalizovat celý postup analýzy do jednoduchého pracovního formuláře.
- Je zajištěn vznik opatření s přesně určeným adresátem, odpovědným za jejich realizaci.
- Relativně malá citlivost na odborné znalosti z oblasti spolehlivosti u pracovníků, kteří se určitým způsobem na vypracování analýzy účastní.

7 Analýza FMECA vstřikovacího stroje a formy

7.1 Získání dat o poruchovosti zařízení

Data pro tuto práci byla dodána firmou Cadence Innovation k.s. ve formě tzv. karty stroje a karty formy. Jedná se o dokument, který obsahuje informace o provedených opravách a poruchách na šesti strojích a šestnácti formách. Ke každé poruše nebo opravě je uveden popis, datum a přibližná doba opravy. U vstřikovacích forem byly místo doby opravy a dat zprostředkovány ceny provedených oprav.

Přestože modely vstřikovacích strojů nebyly ve všech případech totožné, bylo jejich technické provedení téměř identické. Proto bylo při analýzách přípustné použít data tak, jakoby se jednalo o jeden model vstřikovacího stroje. Totéž platí i pro data šestnácti vstřikovacích forem.

Data vstřikovacího stroje:

Na základě informací uvedených v kartách strojů bylo zjištěno, že stroje pracují téměř souběžně. Tato skutečnost umožnila provést analýzu FMECA pro všechny stroje najednou. Tab. 5 ukazuje přehled o provozu vstřikovacích strojů. Číselné označení strojů je totožné jako na kartě stroje.

Tab. 5: Data o vstřikovacím stroji

číslo stroje	provoz	pravidelná prohlídka stroje			
		doba opravy[h]	doba zarážky[h]	doba opravy [h]	doba zarážky [h]
91	491	81,0	69,5	64	55,5
92	505	68,5	64,5	57	53,0
93	477	71,0	60,0	58	47,0
94	588	99,5	83,0	68	57,5
95	434	94,0	77,0	71	55,5
96	616	127,5	86,5	73	59,5
celkem	3111	541,5	440,5	391	328,0

Pozn.: V tab. 5 nejsou započteny údaje pro pravidelné prohlídky stroje podle opravárenského postupu. Tyto prohlídky se provádějí každých šest měsíců. Doba prohlídky je přibližně 12 hodin, přičemž stroj bývá v zarážce asi 6 hodin.

Data vstřikovací formy:

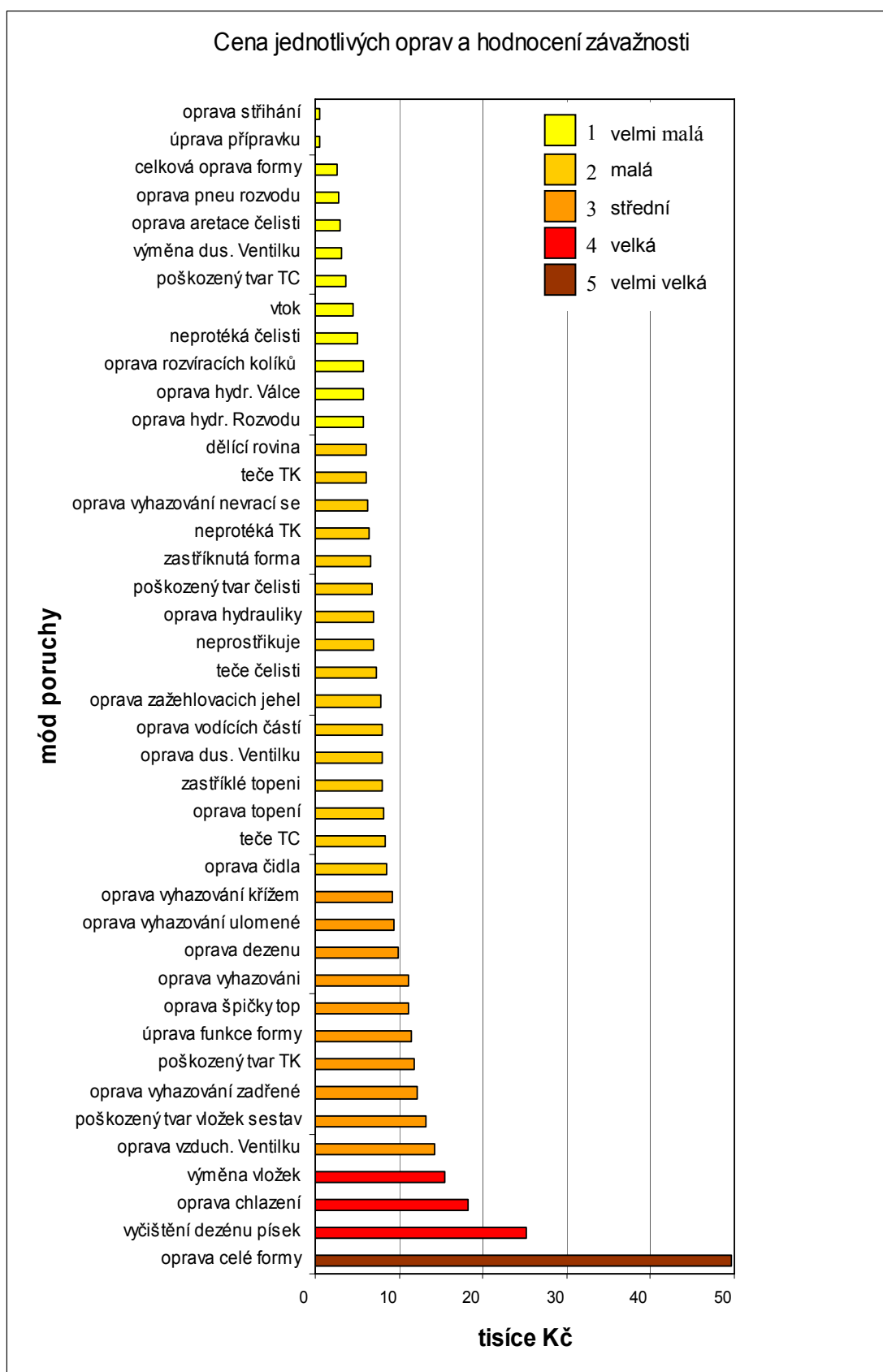
Pro přehlednost jsou poruchy vstřikovací formy uvedeny pro jednotlivé funkční bloky formy. Podrobnější specifikace poruch je uvedena v tab. 7.

Tab. 6: Data o vstřikovací formě

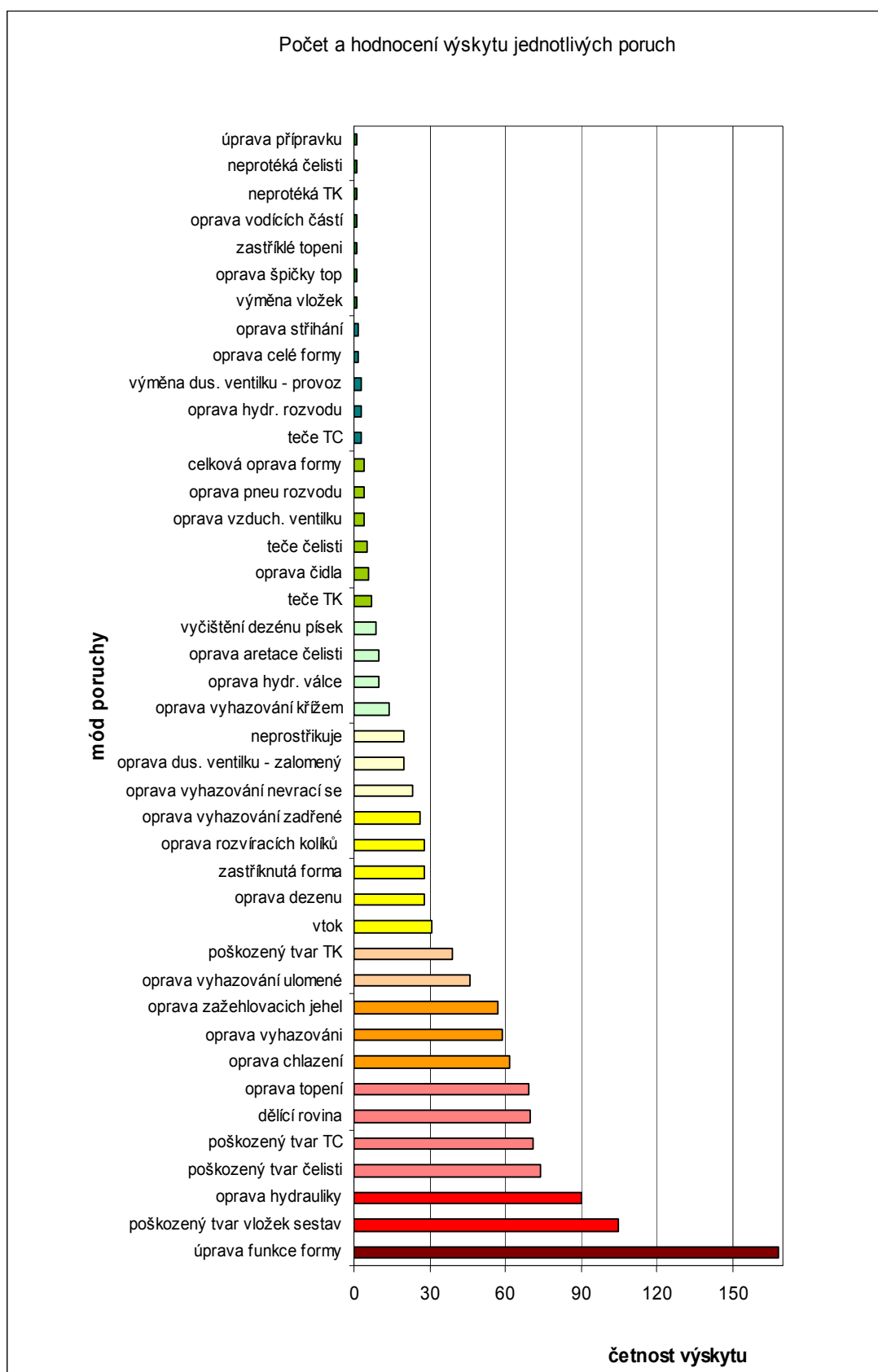
funkční blok	počet poruch na bloku	celková cena poruch na bloku [Kč]
vyhazovač	168	1 673 370
čelisti	90	568 369
tvárník	47	506 778
hydraulika	103	698 661
vzduch.ventilky	27	224 715
topení	71	580 359
dezén	37	502 592
vložky sestav	106	1 396 924
tvárnice	74	282 504
čidlo	6	51 056
vstřikování	48	325 900
úprava přípravku	1	605
oprava zažehlovacích jehel	57	440 476
stříhání	2	930
rozvrací kolíky	28	159 623
vodící části	1	7 906
chlazení	62	1 127 559
pneu. rozvod	4	11 162
dělicí rovina	70	419 616
vtok	31	140 733
celá forma	174	2 024 863

7.2 Tvorba formuláře FMECA pro vstřikovací formu

K vytvoření formuláře FMECA byla využita data o počtu výskytu jednotlivých poruch a cena provedených oprav přepočtená na jednu poruchu. Vzhledem k rozsahu ztrát u jednotlivých módů poruch byla pro cenu oprav byla zvolena stupnice 1 (nejnižší) až 5 (nejvyšší). Z obr. 11 je zřejmé, že nejvyšším stupněm závažnosti (hodnota 5) byl oceněn mód poruchy *oprava celé formy*. Cena této opravy je téměř 50 000 Kč. Pro výskyt jednotlivých poruch u vstřikovací formy byla, kvůli široké škále četnosti poruch, vybrána stupnice 1 (nejmenší) až 10 (nejvyšší). Odhady hodnocení jsou patrné z grafu na obr. 11 a obr. 12. Výsledná hodnota RPN je dána součinem hodnocení významnosti a výskytu. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 7.



Obr. 11: Cena jednotlivých oprav a hodnocení závažnosti pro vstřikovací formu



Obr. 12: Počet jednotlivých poruch a hodnocení výskytu pro vstříkovací formu

Tab. 7: Hodnocení významu a závažnosti poruch a hodnota RPN

funkční blok	jednotlivé módy poruch/ oprav	počet poruch	cena jednotlivých oprav [Kč]	hodnocení závažnosti [1 - 5]	hodnocení výskytu [1 - 10]	RPN
vyhazovač	oprava vyhazování	59	11 115	3	7	21
	oprava vyhazování křížem	14	9 199	3	3	9
	vyhazování - zadřené	26	12 090	3	5	15
	vyhazování - ulomené	46	9 358	3	6	18
	vyhazování - nevrací se	23	6 260	2	4	8
čelisti	poškozený tvar	74	6 712	2	8	16
	oprava aretace	10	3 022	1	3	3
	neprotéká	1	5 116	1	1	1
	teče	5	7 267	2	2	4
celá forma	oprava celé formy	2	49 594	5	1	5
	celková oprava formy	4	2 590	1	2	2
	úprava funkce	168	11 401	3	10	30
	zastříknutá forma	28	6 627	2	5	10
tvárník	poškozený tvar	39	11 736	3	6	18
	neprotéká	1	6 400	2	1	2
	teče	7	6 097	2	2	4
hydraulika	oprava hydrauliky	90	6 931	2	9	18
	oprava hydr. rozvodu	3	5 782	1	1	1
	oprava hydr. válce	10	5 751	1	3	3
vzduch. ventilk	oprava vzduch. ventilk	4	14 213	3	2	6
	oprava dus. ventilk	20	7 936	2	4	8
	výměna dus. ventilk	3	3 048	1	1	1
topení	oprava topení	69	8 134	2	8	16
	oprava špičky	1	11 162	3	1	3
	zastříknuté topení	1	7 983	2	1	2
dezén	vyčištění dezénu - písek	9	25 121	4	3	12
	oprava dezénu	28	9 875	3	5	15
vložky sestav	poškozený tvar	105	13 157	3	9	27
	výměna vložek	1	15 487	4	1	4
tvárnice	poškozený tvar	71	3 628	1	8	8
	teče	3	8 296	2	1	2
ostatní poruchy	oprava čidla	6	8 509	2	2	4
	neprostřikuje	20	7 017	2	4	8
	úprava přípravku	1	605	1	1	1
	oprava zažehlovacích jehel	57	7 728	2	7	14
	oprava stříhání	2	465	1	1	1
	oprava rozvracích kolíků	28	5 701	1	5	5
	oprava vodících částí	1	7 906	2	1	2
	oprava chlazení	62	18 186	4	7	28
	oprava pneu. rozvodu	4	2 791	1	2	2
	oprava dělicí roviny	70	5 995	2	8	16
	oprava vtoku	31	4 540	1	5	5

Vyhodnocení analýzy FMECA pro vstříkovací formu:

Při analýze FMECA bylo provedeno hodnocení závažnosti (1-5) a výskytu (1-10) u 42 poruchových módů. Celkově byla na vstříkovací formě provedena oprava 1207 poruch, přičemž celkové náklady na opravu byly 380 528 Kč. Z analýzy vyplynulo, že nejzávažnějším módem poruchy byla úprava funkce formy. Hodnota RPN zde dosáhla 30 z 50 možných bodů, tj. 60%. Módy poruch s nejvyššími hodnotami RPN jsou v Tab. 8.

Tab. 8: Poruchy s nejvyššími hodnotami RPN

mód poruchy / opravy	počet poruch	cena jednotlivých oprav [Kč]	hodnocení závažnosti [1 - 5]	hodnocení výskytu [1 - 10]	RPN
úprava funkce formy	168	11 401	3	10	30
oprava chlazení	62	18 186	4	7	28
poškozený tvar vložek sestav	105	13 157	3	9	27
oprava vyhazování	59	11 115	3	7	21

7.3 Analýza FMECA pro vstříkovací stroj

K vytvoření formuláře byla použita data z tzv. karty stroje, která byla dodána firmou Cadence Innovation k.s.. Tento dokument obsahuje číselné údaje o stroji, datum události, popis události, číselné označení události, dobu zarážky v hodinách, počet odpracovaných hodin a podpisy zaměstnanců. Na základě těchto dat byly pro potřeby analýzy FMECA vypočteny následující informace o poruchách stroje:

- Počet výskytů jednotlivých poruch
- Doba zarážky na jednu poruchy (význam II)
- Počet odpracovaných hodin na jednu poruchu (význam I)

Pro určení čísla priority rizika (RPN) byla vybrána pětibodová stupnice hodnocení významu a výskytu poruch. Hodnocení bylo provedeno obdobným způsobem, jako v případě vstříkovací formy. Pomocné grafy jsou uvedeny v příloze [A]. Výsledky přehledně shrnuje tab. 9.

Tab. 9: Formulář FMECA pro vstřikovací stroj

blok	součást	popis poruchy/opravy	výskyt	hodnocení významu I	hodnocení významu II	RPN
filtry	hc35	výměna	5	1	1	5
	hc60	výměna	4	2	2	16
	filtr vývěvy	výměna	1	3	2	6
		ucpaný	1	1	1	1
	hydraulický filtr	výměna	1	1	1	1
	<i>ostatní</i>	výměna	1	1	1	1
chlazení	ventil chlazení oleje	výměna	1	3	2	6
		čištění	1	1	1	1
		oprava	1	1	1	1
	přívodní filtr chlazení	ucpaný	1	1	1	1
	oprava chlazení		2	2	2	8
závěr toku taveniny		únik oleje	1	4	3	12
		zadření	2	5	4	40
		oprava	1	3	2	6
šnek		únik oleje	1	1	1	1
		znečištěný	2	5	4	40
	špice šneku	oprava	1	3	2	6
	ventil šnekování	propouští	1	4	3	12
	trysky+labyrint	výměna	1	2	2	4
maguire	zpětný uzávěr	výměna	1	1	5	5
		nedávkuje	1	5	4	20
dopravník		poškozen	1	3	2	6
		vadný motor	1	4	3	12
dorazy		oprava	1	5	4	20
term		výměna	1	3	2	6

Pozn: Ve formuláři je sloupec pro hodnocení výskytu shodný s výskytem dané poruchy, protože četnost jednotlivých poruch byla v rozsahu 1-5. *Maguire* je název pro zařízení na vysoušení plastových granulí.

7.4 Další metody pro analýzu rizika

V této kapitole bude k zpracování analýzy rizika použito Paretova principu a tzv. matice rizik. Jde přitom o jednodušší nástroje (vzhledem k FMECA), jejichž výstupy lze použít jako referenční data při etapě návrhu systému.

7.4.1 Paretova analýza

Paretova analýza je kvantitativní analýza příčin a následků, která obvykle zkoumá příčiny závad. Tyto příčiny se seřadí dle počtu jimi způsobených následků, popř. dle nákladů způsobených následků. Poté je dle Paretova rozdělení analyzováno, které příčiny způsobují relativně největší objem následků. Tyto příčiny by měly být

odstraněny jako první v pořadí. Relativní rozdělení příčin a následků se zobrazuje v Paretově diagramu.

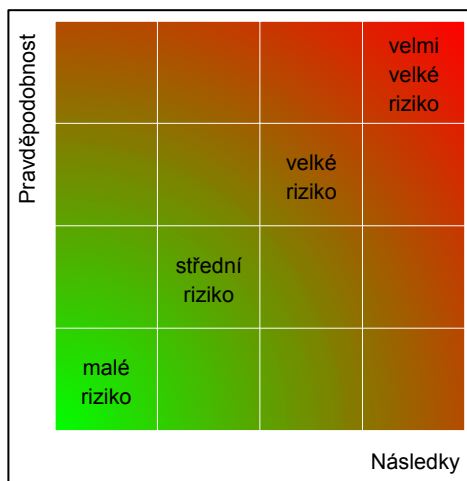
7.4.1.1 Paretovo rozdělení a konstrukce Paterova diagramu

Paterovo rozdělení ukazuje skutečnost, že není nutné zabývat se všemi příčinami, ale pouze nejdůležitějšími z nich. Obvykle jde o poměr 80:20 (80% následků je způsobeno 20 % příčin). Pro konstrukci Paterova diagramu bude na základě [1] využit následující postup:

- vymezit všechny typy poruch či specifikovat všechny příčiny, které vyvolávají vznik daného problému.
- stanovit kritérium, podle kterého se budou analyzované poruchy, příčiny či problémy hodnotit (obvykle je to četnost, náklady, hledisko závažnosti apod.).
- sestupně uspořádat jednotlivé poruchy, příčiny či problémy podle stanoveného kritéria (například od nejvyšší četnosti k jejich nejmenší četnosti) ve formě tabulky, v níž je pro každou poruchu uvedena absolutní četnost, kumulativní četnost a kumulativní relativní četnost (uváděná v procentech).
- sestrojít graf, v němž jsou na vodorovné ose uvedeny všechny druhy poruch, seřazené podle četnosti jejich výskytu v sestupném pořadí, na levé svislé ose jsou vyneseny příslušné absolutní četnosti a na pravé ose jsou vyznačeny kumulativní relativní četnosti; v koncových bodech intervalů příslušných jednotlivým druhům poruch je vynesena jejich četnost. Spojením bodů kumulativní relativní četnosti vznikne lomená čára. Z jejího průběhu se odečte zvolená hladina důležitosti (např. 80 %). Ta ukazuje, které typy poruch je nutno aktuálně řešit, aby došlo k výrazné nápravě. Lomená čára kumulativních četností vyjádřená v procentech se nazývá Lorenzova křivka.

7.4.2 Matice rizika

Matice rizika je grafickým nástrojem pro efektivní posouzení míry rizika procesu. Způsob jejího zobrazení umožňuje snadno určit priority, kterými je třeba se přednostně zabývat. Uspořádání jednotlivých prvků v matici vychází ze zvolených parametrů – pravděpodobnosti výskytu události a možných následků (ekonomické, zdravotní,...). Pro matici rizika je charakteristické, že nerizikovější událost je v pravém horním rohu matice.



Obr. 13: Matice rizika

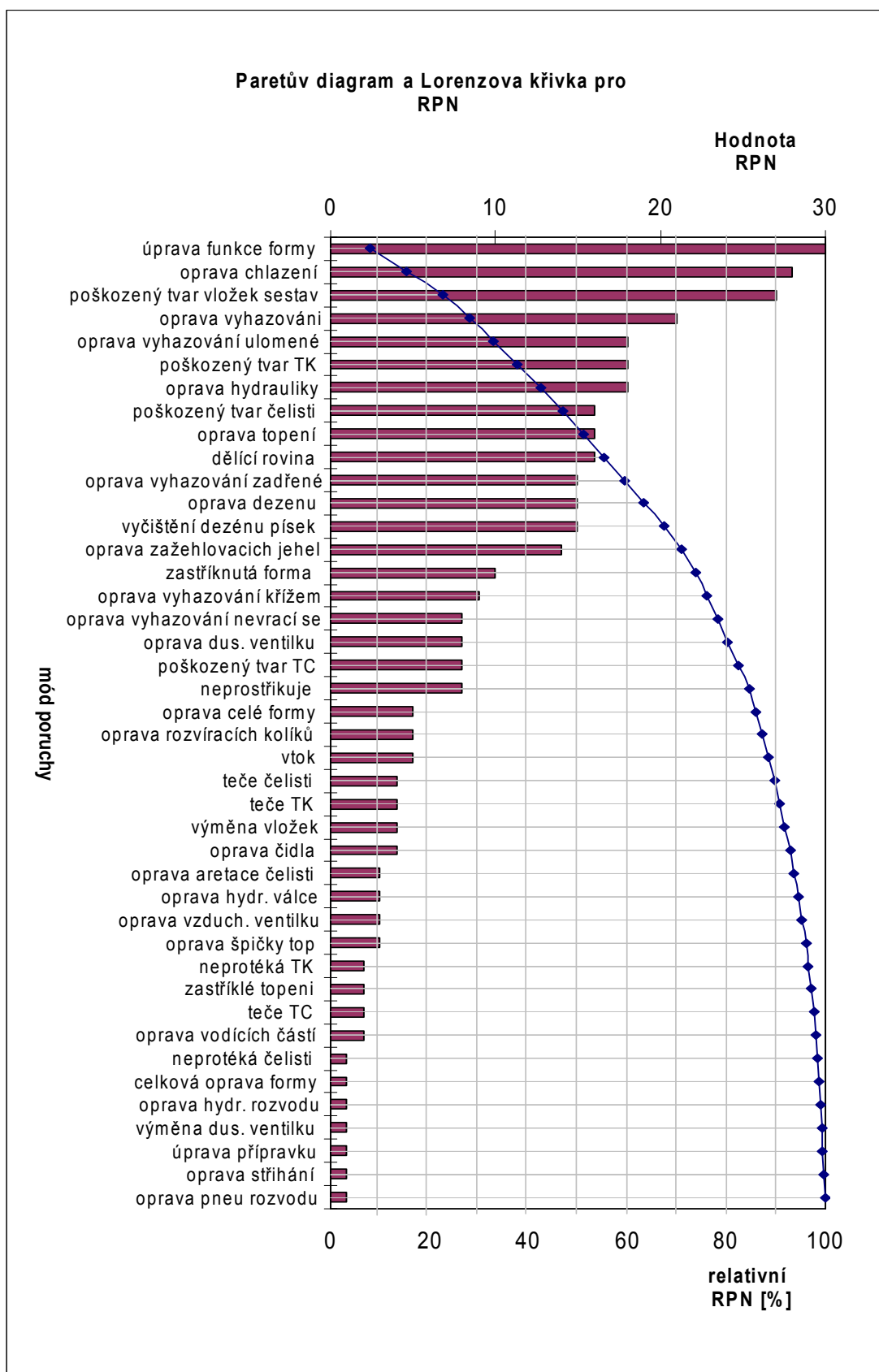
7.5 Aplikace jednoduchých nástrojů na vstřikovací stroj a formu

7.5.1 Paretova analýza

Aby byla zajištěna vysoká vypovídací schopnost analýzy, je nezbytné do Paterova diagramu zahrnout všechna kritéria, která mohou riziko ovlivnit. Vybraná kritéria jsou:

- Vstřikovací forma: náklady na opravu, četnost poruch
- Vstřikovací stroj: doba zarážky, odpracované hodiny, četnost poruchy

Při konstrukci diagramu budou využity hodnoty RPN z analýzy FMECA, tzn. součin bodových odhadů výše uvedených kritérií. Paterův diagram a Lorenzova křivka pro náklady na opravu vstřikovací formy a pro četnost poruch jsou uvedeny v příloze [B].



Obr. 14: Paterův diagram a Lorenzova křivka pro RPN

7.5.2 Matice rizika

Při tvorbě matice rizika pro vstřikovací formu byla pravděpodobnost výskytu poruchy určena jako podíl výskytu jednotlivých poruch a celkového počtu poruch na vstřikovací formě. Počet řádků resp. sloupců matice rizika je zvolen na základě hodnocení výskytu resp. závažnosti poruch, které bylo provedeno v analýze FMECA. Míru závažnosti zde vyjadřují ztráty, tzn. náklady spojené s opravou jednotlivých poruch na vstřikovací formě.

výskyt poruchy	četnost	pravděpodobnost	hodnocení					
	> 104 z 1000	> 1,04E-01	10			1		
	104 z 1000	1,04E-01	9		1	1		
	70 z 1000	7,04E-02	8	1	3			
	54 z 1000	5,39E-02	7		1	1	1	
	46 z 1000	4,56E-02	6			2		
	29 z 1000	2,90E-02	5	2	1	2		
	21 z 1000	2,07E-02	4		3			
	12 z 1000	1,24E-02	3	2		1		1
	6 z 1000	5,80E-03	2		3			
	3 z 1000	2,49E-03	1	7	4	2	1	1
				1	2	3	4	5
				< 6	<6;9)	<9;15)	<15;25,5>	> 25,5
				ztráty [tisíce Kč]				

Obr. 15: Matice rizika pro vstřikovací formu

Čísla v matici rizika znamenají počet poruch pro odpovídající RPN (součin řádkového a sloupcového indexu). Z Obr. 15 lze říci, že žádná z poruch na vstřikovací formě není 100% kritická, neboť neleží v oblasti pravého horního rohu. Přestože některé poruchy jsou velmi četné, jsou jejich následky zanedbatelné a výsledné riziko je stále ještě akceptovatelné.

výskyt poruchy	odhad četnosti	pravděpodobnost	hodnocení					
> 12 ze 100	1,43E-01	5	1					
12 ze 100	1,14E-01	4		1				
9 ze 100	8,57E-02	3						
6 ze 100	5,71E-02	2		1				2
3 ze 100	2,86E-02	1	7	2	6	3	2	
				1	2	3	4	5
doba zarážky [hodiny]				< 1,5	<1,5;2)	<2;2,5)	<2,5;3>	> 3
doba opravy [člověkohodiny]				< 1,5	<1,5;2,5)	<2,5;3,5)	<3,5;5,5>	> 5,5

Obr. 16: Matice rizika pro vstřikovací stroj

K výpočtu RPN pro vstřikovací stroj byla použita dvě významová kritéria – doba zarážky D_Z a doba opravy D_O . Bylo proto nutné stanovit „klíč“, který umožní součin $D_Z \cdot D_O$ vyznačit na stupnici 1-5. Stupeň hodnocení ve směru osy x je tedy odvozen ze vztahu $\sqrt[3]{D_Z^2 \cdot D_O}$. Takto zvolená stupnice dává záměrně větší význam době zarážky, která je pro firmu z pohledu ztrát více riziková. Zároveň je možné zaznamenat počet jednotlivých poruch do matice rizik.

Příklad: Oprava špice šneku má přidělena kritéria:

- Výskyt = 1;
- Doba zarážky - $D_Z = 3$;
- Doba opravy - $D_O = 2$.

Dosazením do výše uvedeného vztahu dostaneme $\sqrt[3]{3^2 \cdot 2} = \sqrt[3]{18} \cong 3$, tj. x-ovou souřadnici matice rizika (sloupcový index). Hodnota y-ové souřadnice (řádkový index) odpovídá hodnocení výskytu, tj. 1. Oprava špice šneku proto leží v matici rizika na pozici [3,1]. Z matice rizika je znovu vidět, že poruchy na vstřikovacím stroji jsou mimo oblast velmi vysokého rizika.

8 Teorie udržovatelnosti technických zařízení

Udržovatelnost, jako jedna ze složek spolehlivosti, představuje významnou vlastnost objektu. Udržovatelnost znamená způsobilost objektu předcházet pomocí údržby vzniku poruchy. Obecně je údržba definovaná v ČSN IEC 50(191) jako kombinace všech technických a administrativních činností, včetně činností dozoru, zaměřených na udržení ve stavu nebo navrácení objektu do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Významnou úlohu v problematice údržby zastává tzv. systém technické údržby. V literatuře [4] jsou popsány následující systémy technické údržby:

- systém údržby po poruše
- systém údržby po prohlídce
- systém standardní preventivní péče
- systém preventivních periodických oprav
- systém postupné výměny skupin
- systém údržby podle skutečného technického stavu
- systém údržby založený na ekonomické optimalizaci
- systém údržby zaměřené na bezporuchovost
(reliability centered maintenance, ČSN IEC 300-3-11)

Cílem systému technické údržby je stanovit optimální strategii údržby. Použitím vhodných metod a činností lze docílit změn dílčích ukazatelů spolehlivosti objektů. V takovém případě se udržovatelnost soustředí na spolehlivost a bezporuchovost objektu. Zároveň lze takto zvoleným postupem modelovat charakteristiky rizika, neboť riziko reprezentuje pravděpodobnost poruchy (bezporuchovost), která úzce souvisí se spolehlivostí.

Pro specifikaci udržovatelnosti se včetně hlavních ukazatelů (uvedených v kapitole 4.3) používá řada ukazatelů, které jsou založeny na sledování různých dob při provádění údržby. Jsou to např.:

- střední doba aktivní údržby
- střední doby preventivní údržby
- střední doby opravy
- střední doby do obnovy
- střední doby různých zpoždění a pod.

Programy systémů technické údržby jsou vytvářeny již v etapě návrhu (vývoje) systému. Zvažují se především důsledky (ekonomické, zdravotní, na životní prostředí)

možných poruch vznikajících v provozu. Vzhledem k těmto důsledkům se zkoumá rozsah, frekvence a účelnost odpovídajících a nutných preventivních i nápravných úkonů údržby. Moderní přístupy tvorby systému technické údržby vyžadují vysoké nároky na spolehlivost a zároveň zachování optimální velikosti nákladů. To znamená snížit náklady na údržbu a zároveň získat vysokou bezporuchovost a spolehlivost. Kritickým parametrem je ve většině případů pohotovost objektu, která je funkcí jak bezporuchovosti, tak udržovatelnosti.

8.1 Metoda pro přidělení udržovatelnosti

Způsob přidělování udržovatelnosti je popsán v ČSN IEC 706-6. Norma je vhodná pro řešení a prokazování udržovatelnosti a hodnocení údajů o udržovatelnosti.

Při přidělování udržovatelnosti je nezbytné zavést následující pojmy:

Doba aktivní údržby po poruše - ACMT - část doby aktivní údržby, během níž se na objektu provádějí operace údržby po poruše.

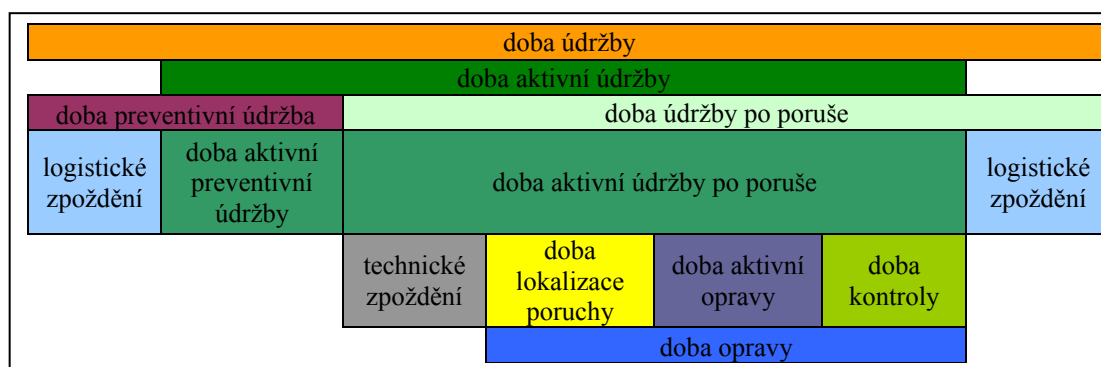
Jednotka vyměnitelná v provozu - LRU - funkční systém, který je vhodný a je určen k demontáži ze systému jako část jediné údržbářské činnosti na provozní úrovni údržby.

Maximální doba aktivní údržby po poruše - $ACMT_{95}$ - obvykle 95 %-kvantil rozdělení doby aktivní údržby po poruše, tj. ta část doby aktivní údržby po poruše, během níž lze uskutečnit na systému 95% všech činností údržby po poruše.

Medián dob aktivní údržby po poruše - $ACMT_{50}$ - ta část doby aktivní údržby, během níž lze uskutečnit na systému 50 % všech činností údržby po poruše.

Střední doba aktivní údržby po poruše $MACMT$ - střední hodnota rozdělení doby aktivní údržby po poruše.

Na následujícím obrázku je vidět rozdíl mezi dobou údržby a dobou aktivní údržby po poruše.



Obr. 17: Diagram doby údržby [9]

8.1.1 Údaje potřebné pro přidělení udržitelnosti

K vypracování metody pro přidělení udržitelnosti je nezbytné určit následující údaje:

- Požadovaná nebo předběžně předpovězená hodnota intenzity poruch λ systému.
- Hodnoty intenzit poruch λ_i takové, aby jejich součet byl pro všech n subsystémů roven λ .

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda$$

- Specifikovaná hodnota MACMT pro daný systém (jinak může být předepsána hodnota $\lambda \cdot \text{MACMT}$, tj. střední doba aktivní údržby za jednotku provozní doby).
- Specifikovaná hodnota ACMT₉₅.

Intenzita poruch je určena (odhadem) jako podíl počtu poruch a kumulované doby provozu 6-ti strojů. Doby provozu strojů byly učeny z údajů na kartě stroje.

Tab. 10: Doba provozu vstřikovacího stroje

číslo stroje	uvedení do provozu	ukončení provozu	počet dní provozu
91	29.1.2005	4.6.2006	491
92	29.1.2005	18.6.2006	505
93	29.1.2005	21.5.2006	477
94	24.10.2004	4.6.2006	588
95	30.1.2005	9.4.2006	434
96	6.10.2004	14.6.2006	616
celkem			3 111

Z Tab.10 vyplývá, že kumulovaná doba provozu vstřikovacího stroje je 74 664 hodin. Počet poruch identifikovaných na vstřikovacím stroji je 35. Intenzita poruch λ se vypočte následovně:

$$\lambda = \frac{35}{74664} = 4,69 \cdot 10^{-4}$$

Jednotlivé subsystémy vstřikovacího stroje jsou zvoleny stejně, jako tomu bylo v analýze FMECA. Rozklad byl proveden na základě označení poruchových stavů v kartě stroje. Vypočítané hodnoty intenzity poruch jednotlivých subsystému jsou v následující tabulce.

Tab. 11: Intenzita poruch subsystémů vstřikovacího stroje

LRU	intenzita λ_i [h^{-1}]
filtry	$1,74 \cdot 10^{-4}$
chlazení	$9,38 \cdot 10^{-5}$
šnek	$8,04 \cdot 10^{-5}$
závěr toku taveniny	$5,36 \cdot 10^{-5}$
maguire	$2,68 \cdot 10^{-5}$
dopravník	$1,34 \cdot 10^{-5}$
dorazy	$1,34 \cdot 10^{-5}$
term	$1,34 \cdot 10^{-5}$

Střední doba aktivní údržby po poruše MACMT je odvozena jako průměrná doba zarážky stroje.

$$MACMT = ACMT_{50} \cdot e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}$$

$$MACMT = 1,84 \text{ h}$$

Maximální doba aktivní údržby po poruše odpovídá maximální době zarážky na vstřikovacím stroji.

$$ACMT_{95} = 6 \text{ h (zadření závěru toku taveniny)}$$

Na základě informací popsaných v předchozích bodech se má každému subsystému i přidělit požadovaná hodnota $ACMT_i$. Z odvozených údajů lze říci, že MACMT musí být 1,84 hodin a zároveň 95% všech oprav musí být dokončeno za dobu 6 hodin. Takto formulované požadavky lze nalézt v [2].

8.1.2 Postup přidělení udržitelnosti podle ČSN IEC 706-6

Při provádění metody přidělování udržitelnosti se předpokládá, že dobu údržby lze popsat pomocí tzv. logaritmicko-normálního rozdělení se střední hodnotou MACMT a s 95%-kvantilem $ACMT_{95}$. Log-normální rozdělení je variantou normálního rozdělení pro data, která jsou jednostranně ohraničena, např. na základě fyzikálního významu (tlak, objem, hmotnost, ...), kdy nabývají pouze kladných hodnot nebo mají přirozeně definovaný počátek (teplota). Log-normální rozdělení má tedy taková náhodná veličina, která leží v intervalu $0 \leq x < \infty$ a souvisí s logaritmickou transformací normálního rozdělení.

Odhad parametrů logaritmicko-normálního rozdělení (se směrodatnou odchylkou σ), kterým se má ACMT řídit se určí následovně:

- Počáteční bod rozdělení je dán jako $ACMT_{95}$.
- Střední doba aktivní údržby po poruše je MACMT.

Z platnosti vztahů $\frac{ACTM_{95}}{MACMT} = e^{1,64\sigma - 0,5\sigma^2}$ a $\frac{ACTM_{50}}{MACMT} = e^{-0,5\sigma^2}$

vyplývá $\frac{ACTM_{50}}{MACMT} = \frac{ACTM_{95}}{MACMT} = e^{-1,64\sigma} = f\left\{\frac{ACTM_{95}}{MACMT}\right\}$

Na základě grafu, který je součástí [8] lze určit $ACMT_{50}$. Tato hodnota poskytuje druhý bod distribuční funkce, který umožňuje zakreslit přímku do logaritmicko-normálního diagramu. K získání hodnot doby aktivní údržby po poruše pro subsystémy zařízení je třeba splnit následující body:

- Identifikují se všechna LRU a uspořádají se v klesající řadu intenzit poruch.
- Pro každou LRU se vypočítá relativní četnost f_i :

$$f_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k}$$

- Pro každou LRU_i se vypočítá funkce kumulativní četnosti F_i :

$$F_i = f_1 + f_2 + \dots + f_i.$$

- Pro každou hodnotu LRU_i se vypočítá $F_i - (1/2)f_i$ a zjistí se odpovídající hodnota $ACMT$ identifikovaná pro logaritmicko-normální rozdělení pro LRU_i

$$F_i - (1/2)f_i < 0.95.$$

- Pro všechna LRU , pro která je $F_i - (1/2)f_i \leq 0.95$ se stanoví

$$ACMT_{i,95} = \frac{\lambda \cdot MACMT - \sum_{i=1}^I \lambda_i \cdot ACMT_i}{\lambda - \sum_{i=1}^I \lambda_i},$$

kde i je pořadové číslo jednotky, pro kterou platí $F_i - (1/2)f_i \leq 0.95$.

8.1.3 Přidělení udržovatelnosti vstřikovacím stroji

Na základě postupu přidělování udržovatelnosti a informací popsanych v kapitole 8.1 byly pomocí pravděpodobnostního papíru získány doby aktivní údržby po poruše $ACMT_i$ pro subsystémy vstřikovacího stroje (sloupec $ACMT_i$ [h] v tab.12). Vynásobením této hodnoty odpovídající intenzitou poruch získáme dobu aktivní údržby za jednotku provozní doby - hodina/provozní hodina (operation hour).

Tab. 12: Přidělení udržovatelnosti pro vstřikovací stroj

i	LRU _i	intenzita λ_i [1/h]	relativní četnost f_i	kumulativní četnost F_i	$F_i - 1/2 \cdot f_i$	$\frac{ACMT_i}{MACMT}$	ACMT [h]	$ACMT_i \cdot \lambda_i$ [h/OH]
1	filtry	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-1}$	$3,71 \cdot 10^{-1}$	$1,86 \cdot 10^{-1}$	0,179	0,33	$5,73 \cdot 10^{-5}$
2	chlazení	$9,38 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$4,71 \cdot 10^{-1}$	0,451	0,83	$7,78 \cdot 10^{-5}$
3	šnek	$8,04 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-1}$	$7,43 \cdot 10^{-1}$	$6,57 \cdot 10^{-1}$	0,804	1,48	$1,19 \cdot 10^{-4}$
4	závěr toku taveniny	$5,36 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$8,57 \cdot 10^{-1}$	$8,00 \cdot 10^{-1}$	1,264	2,33	$1,25 \cdot 10^{-4}$
5	maguire	$2,68 \cdot 10^{-5}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$9,14 \cdot 10^{-1}$	$8,86 \cdot 10^{-1}$	1,928	3,55	$9,50 \cdot 10^{-5}$
6	dopravník	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	$9,43 \cdot 10^{-1}$	$9,29 \cdot 10^{-1}$	2,554	4,70	$6,29 \cdot 10^{-5}$
7	dorazy	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	$9,71 \cdot 10^{-1}$	$9,57 \cdot 10^{-1}$		12,17	$1,63 \cdot 10^{-4}$
8	term	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	1	$9,86 \cdot 10^{-1}$			$1,63 \cdot 10^{-4}$

Výše popsaná metoda pro přidělování udržovatelnosti zařízení je založena na grafickém způsobu řešení. Jeho výhodou je, že není nutné vypočítávat složité výrazy pro lognormální rozdělení pravděpodobnosti. Naopak nevýhodou je nízká přesnost výsledků, způsobená odečítáním hodnot distribuční funkce z lognormálního diagramu.

V současnosti lze výpočty provádět pomocí tabulkových procesorů (Excel) nebo se využívá specializovaných softwarových balíků, které splňují požadavky na přesnost výpočtů a zároveň urychlují proces výpočtu.

V následující kapitole bude předveden výpočet parametrů v prostředí MS Excel. Dosažené výsledky budou porovnány s grafickým řešením, které je součástí přílohy [C].

8.2 Výpočet parametrů rozdělení doby opravy po poruše v MS

Excel

Pro určení distribuční funkce je potřeba, aby byly zvoleny požadavky pro udržovatelnost systému. Tyto požadavky byly odvozeny na základě záznamů o době zářezky vstřikovacího stroje (doba, během které neprobíhá výroba). Tyto požadavky na udržovatelnost lze formulovat takto:

„... MACMT musí být „m“ hodin a U % všech oprav musí být dokončeno za dobu „ACMT₉₅“.

- MACMT=1,84 h
- 95% oprav nesmí trvat déle než 6 hodin, tzn. ACMT₉₅ = 6 h

Z těchto předpokladů lze podle [2] vypočítat parametry log-normálního rozdělení, tj. směrodatnou odchylku σ a střední hodnotu μ .

Výpočet směrodatné odchylky: $MACMT = ACMT_{50} \cdot e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}$

$$ACMT_{50} = ACMT_{95} \cdot e^{-\varphi \cdot \sigma}$$

Řešení této soustavy dvou rovnic pro σ je:

$$\sigma_{1,2} = \varphi \pm \sqrt{\varphi^2 + 2 \cdot \ln\left(\frac{MACMT}{ACMT_{95}}\right)}$$

Po dosazení $\varphi=1,645$ (podle tab. 3); MACMT a $ACMT_{95}$ dostaneme pro menší variační koeficient:

$$\sigma = 1,05$$

Tab. 13: Typické hodnoty kvantilů standardního normálního rozdělení

U	60	70	80	90	95	99	99,9
φ	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	2,326	3,09

Pozn.: Pokud by se stalo, že hodnoty pro $\sigma_{1,2}$ vyjdou jako komplexní čísla, znamená to, že si požadavky odporují, a proto mají být navrženy znovu. Tento případ nastal při výpočtu odvozeném z doby opravy zařízení, tudíž byla k určení parametrů rozdělení použita doba zarážky.

Výpočet střední hodnoty:

$$ACMT_{50} = ACMT_{95} \cdot e^{-\varphi \cdot \sigma}$$

$$\mu = \ln(ACMT_{50})$$

$$\mu = 0,05$$

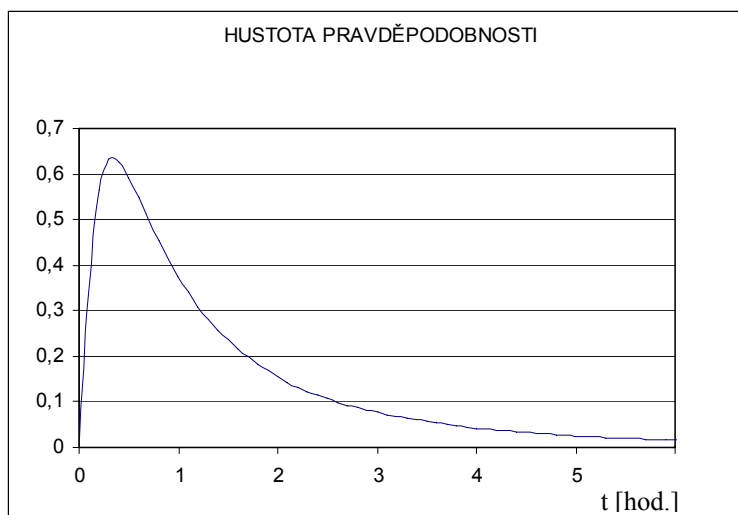
Na základě předchozích výpočtů je možné identifikovat logaritmicko-normální rozdělení doby údržby po poruše. Při výpočtu byl proveden odhad požadavků na udržitelnost zařízení a to na základě střední doby zarážky stroje a maximální hodnotě doby zarážky. Získané parametry rozdělení jsou $\sigma = 1,05$ a $\mu = 0,05$.

Tab. 14: Porovnání hodnot $ACMT_i$

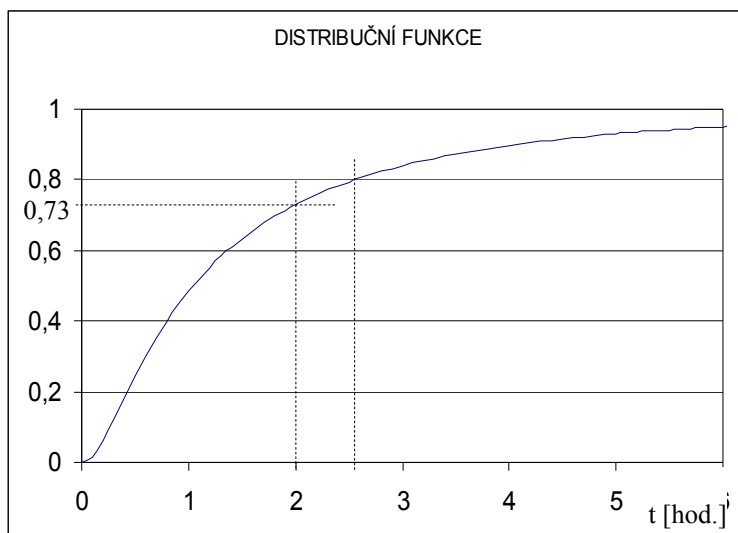
LRU	$F_i - 1/2 \cdot f_i$	hodnoty z excelu	odečtené z log. papíru
filtry	0,19	0,40	0,33
chlazení	0,47	0,96	0,83
šnek	0,66	1,60	1,48
závěr toku taveniny	0,80	2,54	2,33
maguire	0,89	3,74	3,55
dopravník	0,93	4,94	4,7
dorazy	0,96	6,42	12,17
term	0,99	10,69	

Pozn.: Hodnoty z MS Excel v tab.14 jsou získány pomocí funkce LOGINV. Funkce vrátí inverzní funkci k distribuční funkci logaritmicko-normálního rozdělení hodnot x, kde $\ln(x)$ má normální rozdělení s parametry *střední hodnota* a *směrodatná odchylka*.

Průběh distribuční funkce a hustoty pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení je uveden na Obr. 18 a Obr. 19. K vykreslení funkce hustoty pravděpodobnosti v MS Excel bylo použito vztahů uvedených v kapitole 3.8. Bylo zjištěno, že nejpravděpodobnější hodnota sledované doby je přibližně 0,3 hodiny (jde o maximum funkce hustoty pravděpodobnosti, tzv. modus). Tato hodnota odpovídá času, který je potřeba k výměně filtru vstřikovacího stroje.



Obr.18: Hustota pravděpodobnosti doby aktivní údržby po poruše



Obr.19: Distribuční funkce doby aktivní údržby po poruše

Průběhu hustoty pravděpodobnosti nebo distribuční funkce lze využít k řešení úloh tohoto typu:

- Kolik procent poruch bude opraveno do určitého počtu hodin?
- Jaký čas je potřeba k dokončení daného procenta oprav?

Postup výpočtu je předveden na příkladech.

Příklad 1.: Chceme zjistit, kolik procent poruch bude opraveno do 2 hodin. Z předpokladů uvedených v kapitole 8.2 jsou odvozeny parametry pro log-normální rozdělení.

Řešení: Hledáme $P(0 < t < 2)$, tj. pravděpodobnost, že náhodná veličina bude menší než 2 hodiny. Výsledek získáme z průběhu distribuční funkce jako $F(t_2) - F(t_1)$, kde $t_2=2$, $t_1=0$. Výsledná hodnota je přibližně 70%. Výpočet byl proveden pomocí funkce LOGNORMDIST v MS Excel.

Pozn.: Funkce LOGNORMDIST vrátí součtové logaritmicko-normální rozdělení pro x , kde $\ln(x)$ má normální rozdělení s parametry *průměr* a *směrodatná odchylka*. Podrobnější informace o této funkci lze nalézt v nápovědě programu MS Excel.

Příklad 2: Kolik hodin je potřeba, aby bylo dokončeno 80% oprav?

Řešení: K výpočtu použijeme opět průběh distribuční funkce. Výsledek získáme opačným způsobem. Pro $F(t) = 0,8$ je hledaný čas t přibližně 2,6 hodiny. K výpočtu bylo použito funkce LOGINV.

Vypočtené hodnoty doby aktivní údržby po poruše pro jednotlivé subsystémy vstřikovacího stroje a hodnoty RPN , získané na základě analýzy FMECA jsou zaznamenány do tabulky. Jednotlivé subsystémy jsou uspořádány podle vzrůstající intenzity poruch.

Tab. 15: Formulář udržitelnosti pro vstřikovací stroj

systém	Vstřikovací stroj			
subsystém	součást	příznak poruchy/opravy	RPN	doba aktivní údržby po poruše [h]
filtry	hc35	výměna	5	0,4
	hc60	výměna	16	
	filtr vývěvy	výměna	6	
		ucpaný	1	
	hydraulický filtr	výměna	1	
	ostatní	výměna	1	
chlazení	ventil chlazení oleje	výměna	6	0,96
		čištění	1	
		oprava	1	
	přívodní filtr chlazení	ucpaný	1	
	oprava chlazení		8	
	únik oleje		12	
šnek	špice šneku	znečištěný	40	1,6
		oprava	6	
	ventil šnekování	propouští	12	
	trysky+labyrint	výměna	4	
	zpětný uzávěr	výměna	5	
závěr toku taveniny		zadření	40	2,54
		oprava	6	
		únik oleje	1	
maguire*		nedávkuje	20	3,74
		poškozen	6	
dopravník		vadný motor	12	4,94
dorazy		oprava	20	6,42
term		výměna	6	10,69

Závěr

Na základě údajů poskytnutých firmou Cadence Innovation, k. s. byla provedena analýza FMECA a hodnocení rizika pomocí nástrojů spolehlivosti. Byly zjištěny a kvantifikovány jednotlivé poruchy na vstřikovacím stroji a formě. Byla zvolena kritéria, odpovídající povaze poskytnutých dat, tzn. četnost poruch, doba opravy a doba zarážky pro stroj, a četnost poruch a cena oprav pro formu. Dále bylo využito grafických ukazatelů rizika - Paretova diagramu a matice rizika. Výsledky, dosažené metodou FMECA, ukázaly, že poruchy identifikované na obou zařízeních nepatří z pohledu metodiky hodnocení mezi kritické.

Závěr práce byl soustředěn na problematiku udržovatelnosti zařízení, konkrétně přidělování udržovatelnosti. Pro tyto účely byla využita metodika popsaná v technických směrnicích NATO a technických normách. Na základě statistických metod byla zjištěna doba aktivní údržby pro jednotlivé subsystémy vstřikovacího stroje. Byl předveden grafický způsob řešení a výpočet v programu MS Excel. K výpočtu bylo využito integrovaných funkcí i vzorců. Klíčovým problémem této části bylo získat parametry statistického rozdělení, z nichž lze potom odvodit dobu aktivní údržby. Tyto údaje mohou být využity pro návrh strategie udržovatelnosti pro vstřikovací stroje, popřípadě i jiná zařízení.

V průběhu vypracování práce bylo zjištěno, že data v poskytnuté dokumentaci nejsou pro potřeby analýzy tohoto typu vhodně strukturována. Popis jednotlivých poruch byl v několika případech nejednoznačný nebo nečitelný. Proto by se měl způsob záznamu dat o poruchách změnit, např. zavedením databáze s výstižným pojmenováním jednotlivých poruchových stavů a možných příčin, jak je ukázáno ve formuláři FMECA. Použitím elektronického zpracování dat by se navíc proces různých analytických postupů zefektivnil.

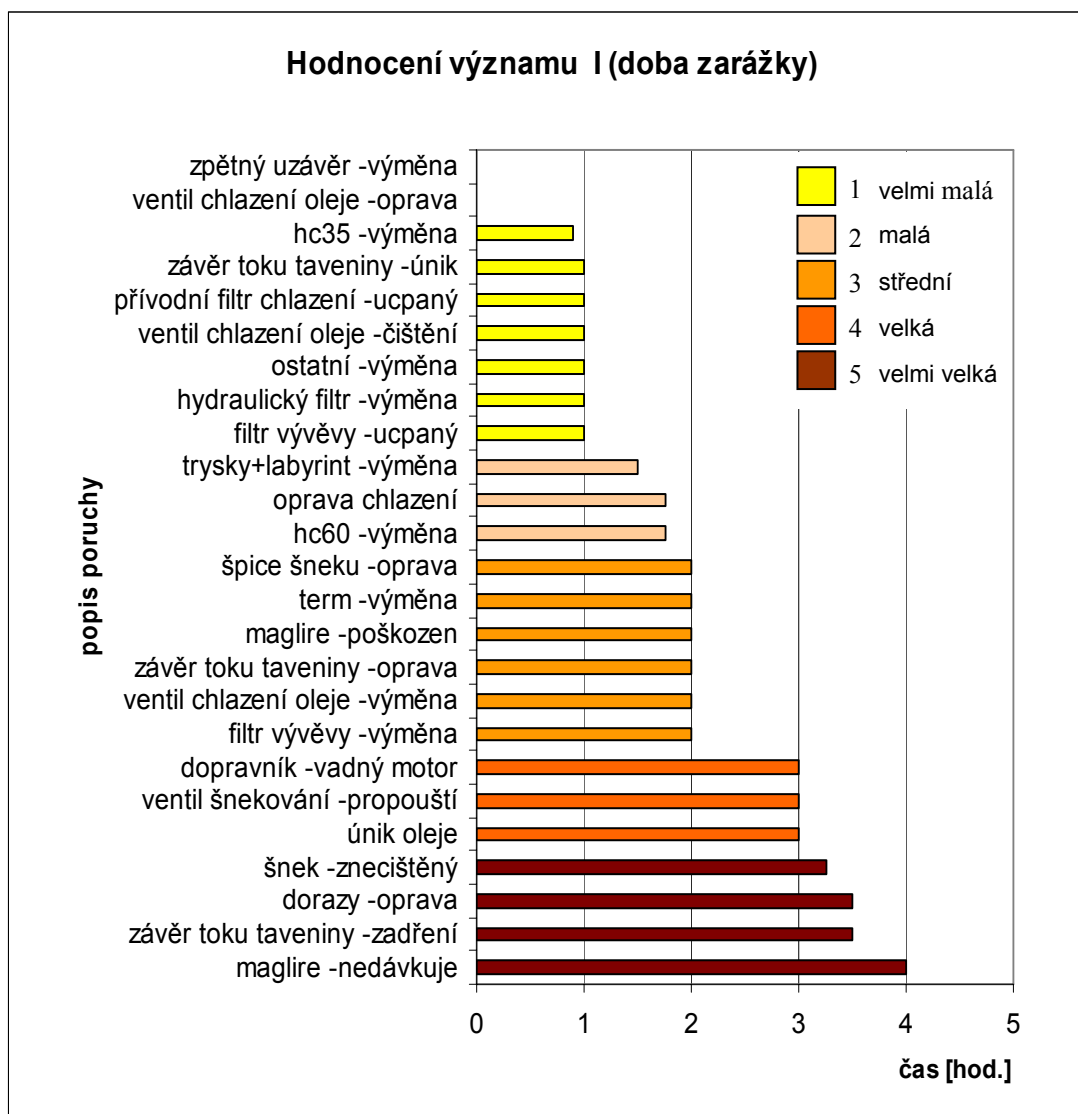
Seznam použité literatury

- [1] Horálek V.: *Jednoduché nástroje řízení jakosti I*. Výstup z projektu podpory jakosti č. 5/16/2004. Národní informační středisko pro podporu jakosti. Praha 2004
- [2] Čepera M.: Směrnice pro vytváření dokumentů NATO pro bezporuchovost a udržitelnost, ČOS 051619, Praha 2005
<http://www.oos.army.cz/cos/pdf/051619.pdf> (offline 22.4.08)
- [3] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J.: *Bezporuchovost a životnost, Techniky analýzy bezporuchovosti*, učební text Liberec 2005
- [4] Fuchs P., Vališ D.: *Metody analýzy a řízení rizika*. Liberec 2004
- [5] Hádek L.: *Organizace a řízení výroby II*. Ostrava 2006.
<http://www.3kpa.webzdarma.cz/orv.pdf> (online 22.4.08)
- [6] Polák J., Masopust T.: *Hodnocení provozu technického zařízení*. Ročníkový projekt 2006/2007
- [7] ČSN EN 60812:2006 *Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*
- [8] ČSN IEC 706-6:1996 *Statistické metody pro hodnocení udržitelnosti*
- [9] ČSN IEC 50 (191):1993 *Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a jakost služeb*
- [10] http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm (online 22.4.08)
- [11] <http://mathworld.wolfram.com/LogNormalDistribution.html> (online 22.4.08)
- [12] <http://mathworld.wolfram.com/Erf.html> (online 22.4.08)
- [13] www.designtech.cz/f/cadinfo/o/Cimatron/cimatron_03b.png (online 22.4.08)
- [14] http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04-vstrikovani%20plastu/06-vstrikovaci%20stroj%20schema.jpg (online 22.4.08)

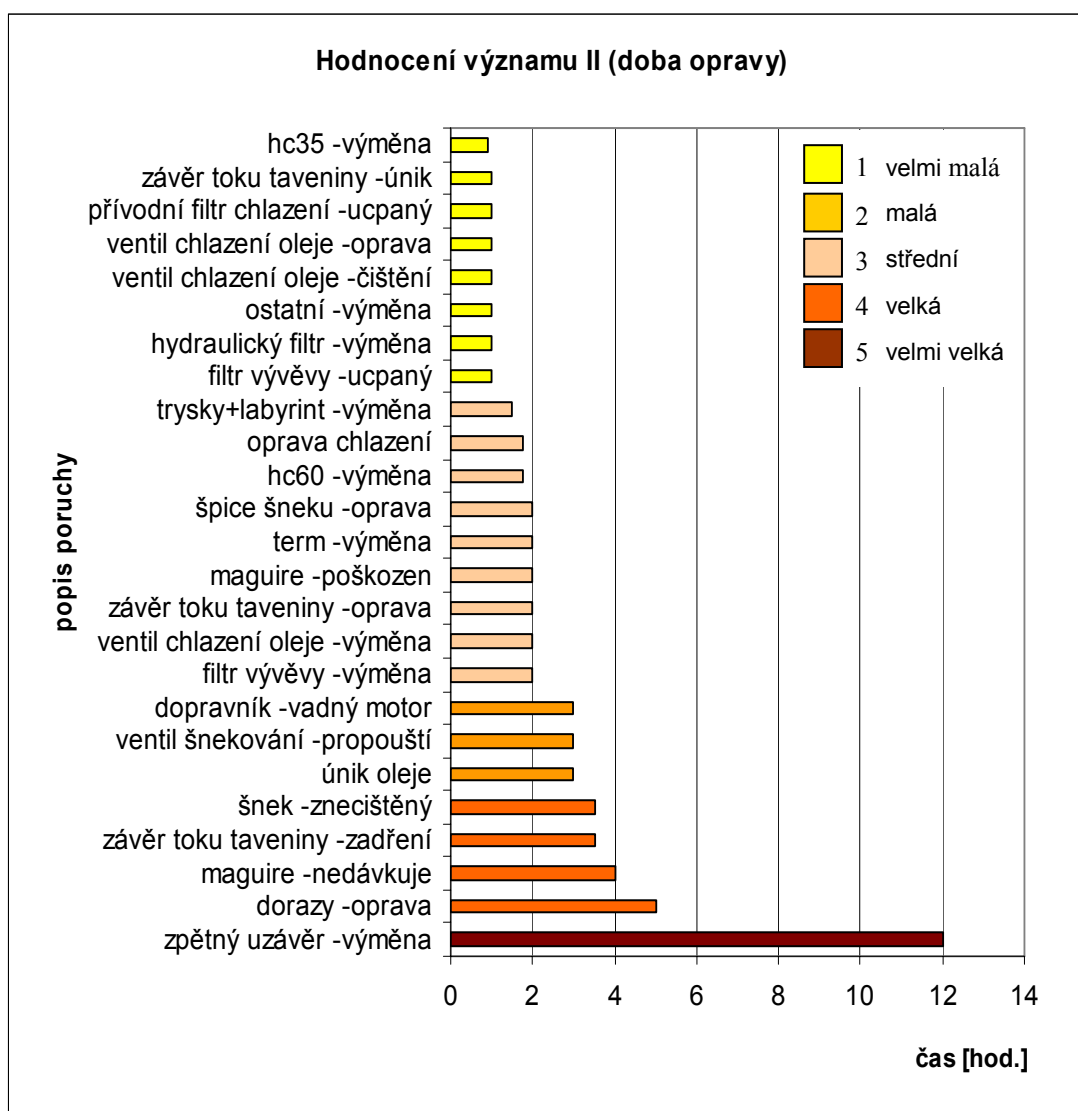
Seznam příloh

- [A] Pomocné grafy hodnocení rizika pro vstřikovací stroje
- [B] Paretův diagram pro náklady a četnost poruch na vstřikovací formě
- [C] Grafické řešení distribuční funkce (pravděpodobnostní papír)

Příloha A - Pomocné grafy hodnocení rizika pro vstřikovací stroje

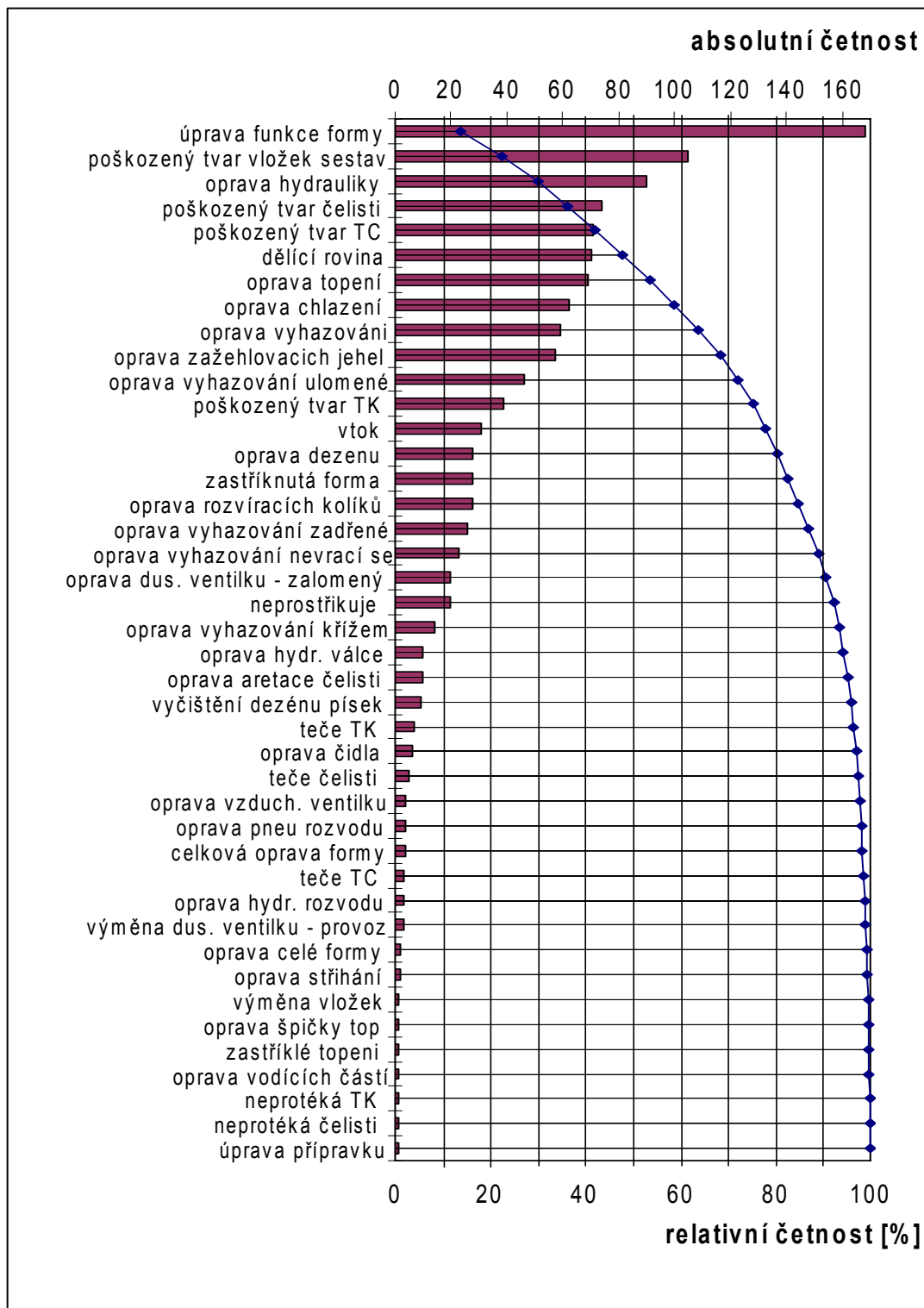


Obr. A 18: Hodnocení významu z hlediska doby zarážky stroje

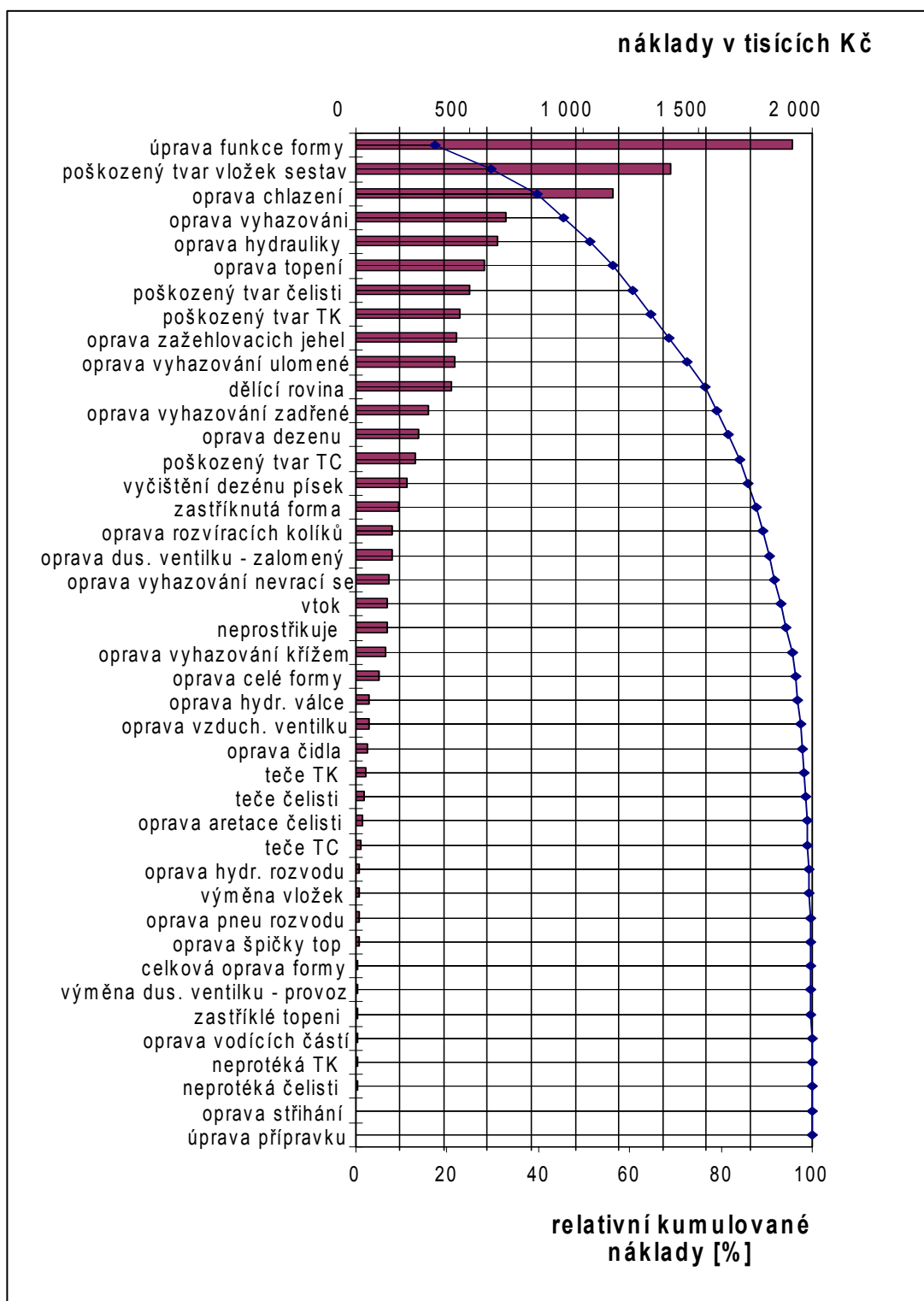


Obr. A 19: Hodnocení významu z hlediska doby opravy stroje

Příloha B - Paretův diagram pro náklady a četnost poruch na vstřikovací formě

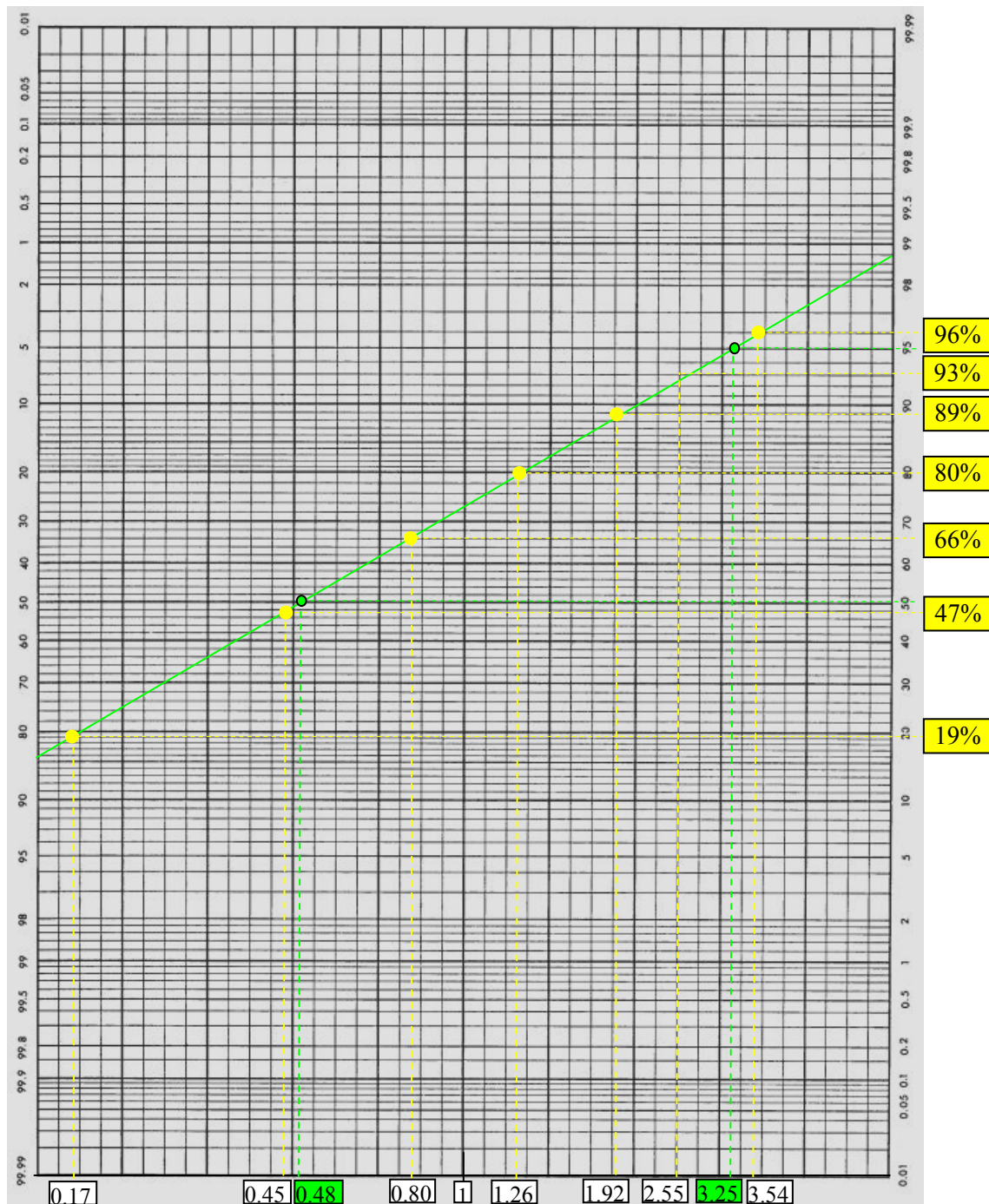


Obr. B 20: Paretův diagram četnosti poruch na vstřikovací formě



Obr. B 21: Paterův diagram nákladů na opravu na vstříkovací formě

Příloha C - Grafické řešení distribuční funkce (pravděpodobnostní papír)



Obr. C 22: Logaritmicko-normální diagram s grafem distribuční funkce